

基于拉曼光谱研究砒砂岩与沙复配土的胶结作用力

郭航^{1,2,3,4}, 韩霁昌^{1,2,3,4*}, 张扬^{1,2,3,4}, 王欢元^{1,2,3,4}, 孙婴婴^{1,2,3,4}, 李修成^{1,2,3,4}, 张海欧^{1,2,3,4}

¹陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 陕西 西安 710075;

²陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司, 陕西 西安 710075;

³国土资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 陕西 西安 710075;

⁴陕西省土地整治工程技术研究中心, 陕西 西安 710075

摘要 为了研究陕北地区毛乌素沙地中砒砂岩与沙复配土颗粒的胶结作用力,将砒砂岩与沙按不同的体积比配制复配土,采用拉曼光谱仪测试复配土粉末的拉曼光谱;根据复配土中化学成分 SiO₂ 在拉曼位移为 464 cm⁻¹ 处的特征峰峰位随砒砂岩含量的变化,研究了土体颗粒胶结作用力的变化。结果表明:沙的峰位为 464.5 cm⁻¹,随着砒砂岩含量增加,峰位逐渐减小;这是因为沙中砒砂岩的添加使得砒砂岩中的小颗粒占据了沙中部分大颗粒的位置,颗粒间的距离变大,颗粒间相互牵引而产生拉应力,从而导致拉曼特征峰红移;当砒砂岩与沙的体积比为 1:1 时,峰位减小到 463.6 cm⁻¹;当砒砂岩与沙的体积比为 7:5 时,土体结构发生坍塌,变得紧实,土体颗粒之间产生了压应力,导致峰位突然增大到 464.2 cm⁻¹,之后土体结构趋于稳定;随着砒砂岩含量进一步增加,仍有砒砂岩小颗粒对沙大颗粒的置换作用,导致拉应力逐渐明显,峰位不断减小,当复配土为全砒砂岩时峰位为 463.1 cm⁻¹。实验结果证实了可将 SiO₂ 分子拉曼光谱特征峰峰位的移动用于研究复配土颗粒间的胶结作用力。

关键词 光谱学; 胶结作用力; 拉曼光谱; 砒砂岩; 复配土; 沙

中图分类号 S152 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.113001

Cementation Force of Compound Soil Mixed by Soft Rock and Sand: Raman Spectrum Study

Guo Hang^{1,2,3,4}, Han Jichang^{1,2,3,4}, Zhang Yang^{1,2,3,4}, Wang Huanyuan^{1,2,3,4},
Sun Yingying^{1,2,3,4}, Li Xiucheng^{1,2,3,4}, Zhang Haiou^{1,2,3,4}

¹ Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd.,
Xi'an, Shaanxi 710075, China;

² Institute of Land Engineering and Technology, Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd.,
Xi'an, Shaanxi 710075, China;

³ Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, the Ministry of Land and Resources,
Xi'an, Shaanxi 710075, China;

⁴ Shaanxi Provincial Land Consolidation Engineering Technology Research Center,
Xi'an, Shaanxi 710075, China

Abstract To study cementation force of compound soil mixed by soft rock and sand in Mu Us sand land in northern Shaanxi, we mix the soft rock and sand in different proportions to prepare compound soil, and then test the Raman spectra of the compound soil. According to the peak position of SiO₂ at Raman shift 464 cm⁻¹ varying with contents of the soft rock in the compound soil, we study the change of the cementation force of the compound soil particles. The results show that the peak position of the sand is 464.5 cm⁻¹. With the increase of the content of the soft rock in the compound soil, the peak position decreases. This is because that the addition of the soft rock causes small

收稿日期: 2017-04-20; 收到修改稿日期: 2017-05-14

基金项目: 陕西省重点科技创新团队计划(2016KCT-23)

作者简介: 郭航(1989—),女,博士,工程师,主要从事土地工程方面的研究。E-mail: 17792503321@163.com

* 通信联系人。E-mail: hanjc_sxdj@126.com

particles in the soft rock to replace the position of large particles in the sand, the distance between soil particles increases, and the tensile stress appears due to tow between particles, which leads to the red shift of the Raman characteristic peak. When the volume ratio of soft rock to sand is 1:1, the peak position decreases to 463.6 cm^{-1} . When the volume ratio of soft rock to sand is 7:5, the soil structure collapses and becomes firm, which results in the generation of compressive stress between particles. The compressive stress results in sudden increase of the peak position to 464.2 cm^{-1} . Then the soil structure becomes stable. With the further increase of the soft rock content, there is still the replacement of small particles of soft rock to large particles of sand, the tensile stress is obvious gradually, and the peak position constantly decreases to 463.1 cm^{-1} when the compound soil is sand. It is proved that the shifting of the peak position of SiO_2 in Raman spectra can be applied to the study of cementation force between particles in compound soil.

Key words spectroscopy; cementation force; Raman spectrum; soft rock; compound soil; sand

OCIS codes 300.6450; 300.6360; 300.6490

1 引言

针对陕北地区毛乌素沙地漏水、漏肥严重的问题,王仁德等^[1]提出将黄土或其他改良剂与沙混合的改良方法,以提高沙地的耕作性能;但毛乌素沙地周围缺少黄土土源,距离最近的黄土土源也在几十千米以外,远距离运输的成本较高,且会对沿途造成严重污染。砒砂岩是一种主要分布在晋陕蒙边界地区的松散岩层,主要是由古生代二叠纪、中生代三叠纪、侏罗纪和白垩纪的厚层砂岩、砂页岩和泥质砂岩组成的岩石互层,成岩程度低,无水时坚硬如石,遇水则松软如泥。砒砂岩在毛乌素沙地中分布广泛^[2],保水性和持水性好,其与沙复配后能有效改善沙土的耕作性能^[3-8]。将毛乌素沙地中广泛分布的砒砂岩与沙混合可形成新型“土壤”,该方法具有可就地取材、节约运输成本和环境友好等优势^[9-11]。韩霁昌等^[10]将砒砂岩与沙复配成土技术应用用于毛乌素沙地的整治工程中,不仅增加了超过 $2 \times 10^8\text{ m}^2$ 的耕地面积,实现了对沙和砒砂岩的资源化利用,而且对当地的固沙也有一定的促进作用。可见,砒砂岩与沙复配成土技术具有显著的经济效益和社会效益。

拉曼光谱是一种散射光谱。当激光入射待测样品时,样品分子的振动和转动使激光与样品分子相互作用,散射出的激光包含 3 部分:出射激光频率等于入射激光频率的部分,即瑞利散射;出射激光频率等于入射激光频率与分子振动或转动频率之和的部分,即斯托克斯散射;出射激光频率等于入射激光频率与分子振动或转动频率之差的部分,即反斯托克斯散射。一般情况下,拉曼光谱仪探测的是反斯托克斯散射。每种物质都有其独特的拉曼谱线,根据拉曼光谱中特征峰的位置、半峰全宽、峰强度等信息能实现对物质结构、状态和性质等的分析^[12-15]。目前,拉曼光谱已广泛应用于材料、化工、石油、高分子、生物、环保、地质等领域。采用拉曼光谱分析土壤样品,可在微观层面实现对土壤结构、性质的更深入、细致的研究。

资料显示,目前对砒砂岩与沙复配土微观性质及机理的研究较少。为了深入理解砒砂岩与沙复配成土的微观作用机理,本文采用拉曼光谱研究了砒砂岩与沙复配土粉末样品颗粒间的胶结作用,期望能对农业生产起到一定的指导作用。

2 实验方法

砒砂岩中的矿物主要包含石英、蒙脱石、长石、方解石、伊利石、高岭石和白云石^[16-19]。砒砂岩的主要化学成分是 SiO_2 (质量分数为 65%)、 Al_2O_3 (质量分数为 14%)、 Fe_2O_3 和 CaO ^[20]。沙中的矿物主要为石英(SiO_2),其质量分数约为 82%,其余矿物主要为长石(质量分数为 10%)、高岭石(质量分数为 4%)、方解石(质量分数为 2%)、闪石(质量分数为 2%)^[7]。

本实验所用砒砂岩和沙均采自陕西省榆林市榆阳区小纪汗乡,将砒砂岩与沙按不同的体积比配制了 15 组复配土粉末,每组重复配制 3 次,配制比例如表 1 所示。将采集的砒砂岩和沙分别进行研磨,过孔径为 1 mm 的筛,然后将过筛的粉末按 15 种体积比进行称量、混合。将砒砂岩与沙混合均匀后,加水搅拌直至均匀,然后在 $100\text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干处理约 3 h,将烘干后的复配土样品再次研磨,过孔径为 1 mm 的筛后置于铝盒中备用。

采用 HR800 型显微共聚焦拉曼光谱仪对制得的粉末样品进行测试。测试时,用药匙从铝盒中自上而下取样,均匀地平铺于载玻片上,然后用另一片载玻片轻轻压平,将承载样品的载玻片置于载物台上,在每个

样品的 3 个不同点处进行测试。由于每种体积比的复配土都重复配制了 3 次,因此每种体积比的土样可测得 9 条拉曼谱线。采用波长为 532 nm 的激光,利用放大倍数为 50、数值孔径为 0.35、视场数为 26.5 的长焦物镜测量拉曼光谱,到达样品表面的激光功率约为 10 mW,光栅常数为 1800/mm,分辨率约为 0.5 cm^{-1} 。

表 1 复配土的配制比例

Table 1 Proportion of soft rock and sand in compound soil

Sample number	Volume fraction of soft rock /%	Volume ratio of soft rock to sand
1	100.0	
2	91.7	11:1
3	83.3	5:1
4	80.0	4:1
5	75.0	3:1
6	66.7	2:1
7	58.3	7:5
8	50.0	1:1
9	41.7	5:7
10	33.3	1:2
11	25.0	1:3
12	20.0	1:4
13	16.7	1:5
14	8.3	1:11
15	0	0:1

采用 Mastersizer 3000 型激光粒度分析仪测定砒砂岩、沙及其复配土颗粒的组成。测试时,15 组土样各取 10 g,每种土样重复测定 3 次。采用 Excel 2007 和 OriginPro 8.5 分别对实验数据进行整理和绘图。

3 实验结果与讨论

3.1 砒砂岩和沙的颗粒组成

砒砂岩和沙的颗粒按粒径可划分为 3 个级别:砂粒,粒径 $d = 0.05 \sim 2 \text{ mm}$,颗粒大;粉粒, $0.002 < d < 0.05 \text{ mm}$,颗粒中等;黏粒, $d < 0.002 \text{ mm}$,颗粒小。沙中砂粒的质量分数为 95.37%;砒砂岩中砂粒的质量分数为 24.52%,约为沙中砂粒质量分数的 1/4。沙中粉粒的质量分数仅为 4.10%;砒砂岩中粉粒的质量分数为 64.98%,约为沙中粉粒质量分数的 16 倍。沙中黏粒的质量分数为 0.53%;砒砂岩中黏粒的质量分数为 10.50%,约为沙中黏粒质量分数的 20 倍。由此可知,与沙相比,砒砂岩中的大颗粒含量很少,但中等颗粒和小颗粒的含量很高。

3.2 复配土的拉曼光谱

图 1 所示为砒砂岩、沙及复配土的拉曼光谱。由图 1 可知:在沙的 9 条拉曼谱线中,其中有 6 条因荧光背景很强而遮盖了拉曼峰的信号,另外 3 条峰形明显的谱线具有很高的重复性,且这 3 个峰的峰位几乎没有发生变化;砒砂岩和复配土的拉曼光谱也具有较好的重复性。由图 1(c)可知:砒砂岩在拉曼位移为 146, 464 cm^{-1} 处出现了特征峰,其中 464 cm^{-1} 处的峰是 SiO_2 的峰;沙在拉曼位移为 128, 206, 264, 355, 394, 403, 464, 809, 1082, 1160 cm^{-1} 处出现了特征峰,这些峰都归属于 SiO_2 分子的不同振动模式^[12,21-23]。这是因为砒砂岩和沙中含量最高的化学成分为 SiO_2 ,砒砂岩中 SiO_2 的质量分数大于 60%,而沙中的 SiO_2 含量比砒砂岩中的 SiO_2 含量更高。在复配土的拉曼光谱中也出现 SiO_2 的特征峰,其中 464 cm^{-1} 处的峰是 SiO_2 的最强特征峰,图 1(d)为该峰的放大图。

沙的特征峰位为 464.5 cm^{-1} ,图 2 所示为拉曼位移 464 cm^{-1} 处的特征峰峰位与复配土中砒砂岩含量的关系。由图 2 可以看出:随着沙中砒砂岩含量增加,特征峰位逐渐减小,当砒砂岩含量开始大于沙的含量时,特征峰位突然增大,之后特征峰位随着砒砂岩含量增加而逐渐减小。拉曼光谱的峰位发生移动可能是由掺杂^[24]或应力^[25]导致的,峰位红移(或蓝移)对应的应力类型为拉应力(或压应力)^[26]。根据拉曼光谱中的峰位移动可推断样品的力学机制^[27]。

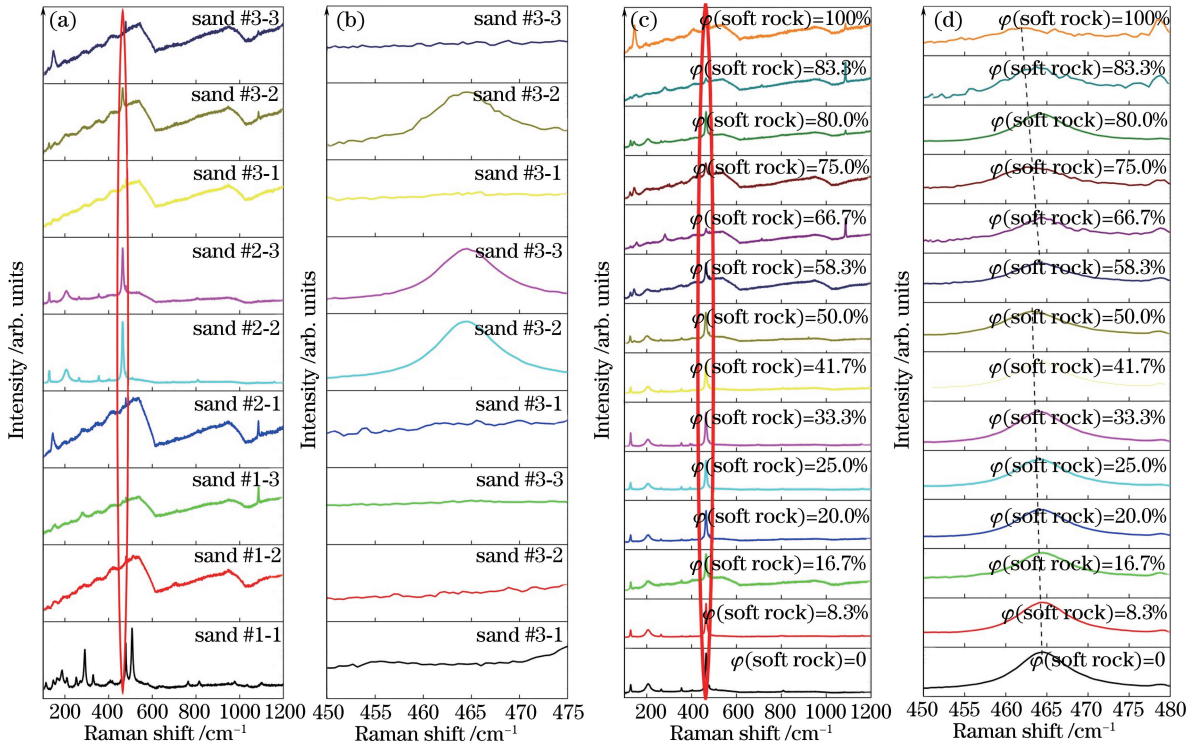


图1 砒砂岩、沙以及复配土的拉曼光谱。(a)(b)沙的9幅拉曼光谱及其放大图；(c)(d)砒砂岩和复配土的拉曼光谱及其放大图

Fig. 1 Raman spectra of soft rock, sand, and compound soil. (a)(b) Nine Raman spectra of sand and their enlarged images;

(c)(d) Roman spectra and their enlarged images of soft rock and compound soil

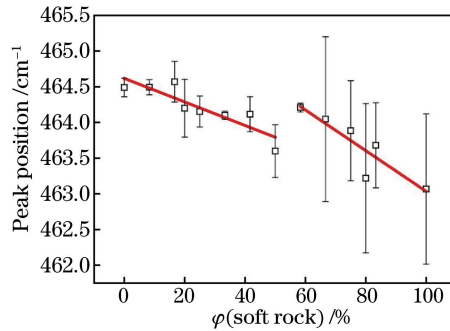


图2 复配土中 SiO_2 在拉曼位移为 464 cm^{-1} 处的特征峰峰位随复配土中砒砂岩含量的变化

Fig. 2 Peak position at Raman shift 464 cm^{-1} of SiO_2 in compound soil varying with content of soft rock

3.3 复配土的微观结构

采用扫描电子显微镜(SEM)观察砒砂岩、沙和复配土的微观结构,结果如图3所示。由图3可知,随着复配土中砒砂岩含量增加,微观结构呈现出一定的演化规律;随着复配土中砒砂岩的体积分数从0(全沙)增加到50.0%,土体结构基本不变,但小颗粒增多;当砒砂岩体积分数大于50.0%后,土体结构出现了坍塌和压实;随着砒砂岩体积分数继续增大,土体结构趋于稳定,小颗粒含量继续增加。结合图3中的土体微观结构和图2中特征峰峰位发生移动反映出的应力,可探讨复配土颗粒胶结作用力随砒砂岩含量变化的演变过程。

3.4 讨 论

根据3.1节中砒砂岩和沙颗粒的组成可知,沙中大颗粒的含量较高,砒砂岩中中等颗粒和小颗粒的含量较高。随着复配土中砒砂岩含量增加,土壤颗粒的胶结环境有所改变。当砒砂岩的体积分数不超过50%时,砒砂岩中的小颗粒占据了沙中部分大颗粒的位置,导致沙中大颗粒与小颗粒之间的距离比沙中大颗粒与大颗粒之间的距离大,因此颗粒之间相互牵引,产生拉应力,如图4(a)和图4(b)所示;当复配土中砒砂岩的体积分数大于50%后,由于复配土中的小颗粒很多,大颗粒不足以支撑土体结构,故而出现坍塌,大小土粒

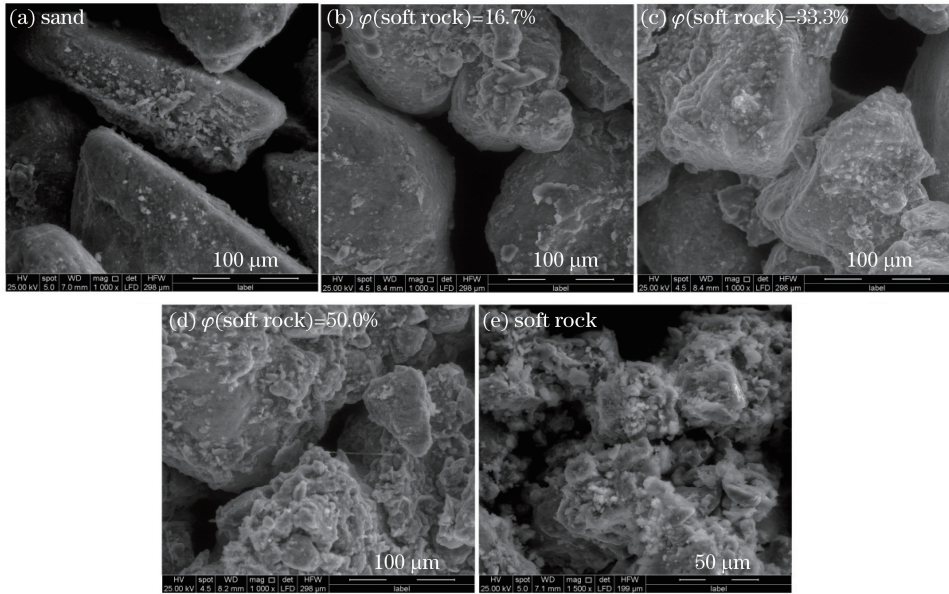


图3 沙、砒砂岩及复配土的 SEM 形貌

Fig. 3 SEM images of sand, soft rock, and compound soil

突然压实,土粒之间相互挤压,产生压应力,如图4(c)所示,表现为图2中峰位突然增大;随着砒砂岩含量进一步增大,土体结构趋于稳定,砒砂岩中的小颗粒对沙中大颗粒进行置换,复配土中小颗粒的含量越来越大。由于小颗粒的比表面积大,相互之间的黏结、聚合作用力强,颗粒之间相互牵引,因此拉伸作用不断增强,如图4(d)所示,对应图2中右半段峰位的再次逐渐减小,当复配土为全砒砂岩时,峰位减小至 463.1 cm^{-1} 。

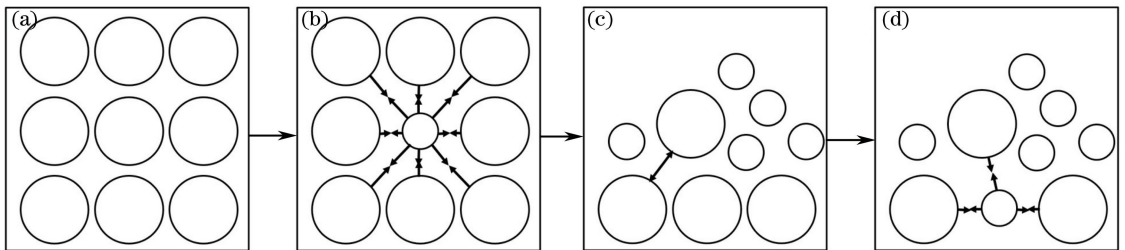


图4 复配土颗粒胶结作用演化过程示意图

Fig. 4 Evolution diagram of cementation of compound soil particles

韩霁昌等^[9]通过田间试验表明:当砒砂岩与沙的体积比为 1:2,即复配土中砒砂岩的体积分数为 33.3% 时,适合种植玉米、小麦和大豆;当砒砂岩与沙的体积比为 1:5,即复配土中砒砂岩的体积分数为 16.7% 时,适合种植土豆。这一结果是合理的,因为种植玉米和小麦需要保水、保肥能力强的土壤,而种植土豆需要质地相对松散的土壤。针对不同作物的生长需求,综合考虑工程成本,应根据具体情况选用不同的复配比例。图2给出了复配土的相对致密(或松散)程度,峰位越大,复配土越松散,据此可以根据需要进行复配比例的选择。

4 结 论

将砒砂岩与沙按不同的体积比配制成复配土,然后测试复配土的拉曼光谱。结果表明:随着砒砂岩含量增加,复配土中最主要的化学成分 SiO_2 在拉曼位移为 464 cm^{-1} 处的特征峰峰位向低波数移动;当砒砂岩与沙的体积比为 7:5 时,峰位突然增大,之后随着砒砂岩含量增加,峰位又逐渐向低波数移动。这是因为在沙中添加砒砂岩后,砒砂岩中的小颗粒占据了沙中部分大颗粒的位置,导致颗粒间的距离增大,颗粒相互牵引而产生拉应力,使得峰位发生红移;当砒砂岩和沙的体积比为 7:5 时,土体坍塌、压紧,产生的压应力导致峰位突然移向高波数;随着砒砂岩含量进一步增加,砒砂岩中小颗粒不断占据沙中大颗粒的位置,拉应力逐渐

起作用,峰位红移。通过分析 SiO₂ 分子的拉曼光谱特征峰峰位随复配比例的变化,对土体颗粒间的胶结作用力进行了研究,据此可以根据需要进行复配比例的选择。

参 考 文 献

- [1] Wang Rende, Wu Xiaoxu. New pattern to control Mu Us sandland[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(5): 176-180.
王仁德, 吴晓旭. 毛乌素沙地治理的新模式[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 176-180.
- [2] Wang Yuanchang, Wu Yonghong, Kou Quan, *et al.* Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2007, 5(1): 14-18.
王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- [3] Han Jichang, Li Juan, Li Xiaoming. Effects of remixed soil with soft rock and sand on physical characters and winter wheat yield[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2013, 22(11): 15-19.
韩霁昌, 李娟, 李晓明. 砒砂岩与沙复配成土的物理性状及其对冬小麦产量的影响[J]. 西北农业学报, 2013, 22(11): 15-19.
- [4] Zhang Lu, Han Jichang, Luo Lintao, *et al.* Water-holding characteristics of compounded soil with feldspathic sandstone and aeolian sandy soil[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2014, 42(2): 207-214.
张露, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与风沙土复配土壤的持水特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(2): 207-214.
- [5] Zhang Lu, Han Jichang, Ma Zenghui, *et al.* Texture character study of feldspathic sandstone and sand compound "soil" [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2014, 23(4): 166-172.
张露, 韩霁昌, 马增辉, 等. 砒砂岩与沙复配“土壤”的质地性状[J]. 西北农业学报, 2014, 23(4): 166-172.
- [6] Li Juan, Han Jichang, Li Xiaoming. Effects of remixed soil with soft rock and sand on photosynthetic characteristics and yield of winter wheat[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(2): 203-209.
李娟, 韩霁昌, 李晓明. 砒砂岩与沙复配成土对小麦光合生理和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(2): 203-209.
- [7] She Xiaoyan, Zhang Xingchang, Wei Xiaorong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(14): 115-123.
摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水 and 保水特性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123.
- [8] Chai Miaomiao, Han Jichang, Luo Lintao, *et al.* Effects of soft rock and sand mixing ratios and crop planting frequency on soil and crop yield[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(10): 179-192.
柴苗苗, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 179-192.
- [9] Han Jichang, Liu Yansui, Luo Lintao. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu sand land region[J]. China Land Sciences, 2012, 26(8): 87-94.
韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94.
- [10] Han Jichang, Fu Pei, Wang Huanyuan, *et al.* The popularization and application of mixing soils farmland technology of arsenic rock zone and sand in Mu Us desert land reclamation engineering [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(25): 7287-7293.
韩霁昌, 付佩, 王欢元, 等. 砒砂岩与沙复配成土技术在毛乌素沙地土地整治工程中的推广应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(25): 7287-7293.
- [11] Fu Pei, Wang Huanyuan, Luo Lintao, *et al.* Farmland-building technology of turning arsenic rock and sand into soil [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33(6): 242-246.
付佩, 王欢元, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土造田技术研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(6): 242-246.
- [12] Zu Endong, Li Maocai, Zhang Pengxiang. Study on jades of SiO₂ by Raman spectroscopy [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology, 2000, 25(3): 77-78.

- 祖恩东, 李茂材, 张鹏翔. 二氧化硅类玉石的显微拉曼光谱研究[J]. 昆明理工大学学报, 2000, 25(3): 77-78.
- [13] Song Xiao, Zhao Xuewei, Hong Ruijin, *et al.* Fabrication and the surface plasmon resonance properties of Al/Al₂O₃ composite films[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(12): 1231001.
宋晓, 赵雪薇, 洪瑞金, 等. Al/Al₂O₃ 复合薄膜的制备及表面等离子体共振性能研究[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1231001.
- [14] Li Yue, Yan Shiyong, Chen Yong. Study of quartz's Raman spectrum at high pressure and room temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(8): 2120-2122.
李月, 颜世永, 陈勇. 高压下石英的激光拉曼光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(8): 2120-2122.
- [15] Wang Qin, Zhao Chang, Yang Huinan, *et al.* Simultaneous measurement of film thickness and mass fraction by Raman spectroscopy[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(9): 093001.
王琴, 赵畅, 杨荟楠, 等. 激光拉曼光谱法同步测量液膜厚度与浓度[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(9): 093001.
- [16] Shi Yingchun, Ye Hao, Hou Hongbing, *et al.* The internal cause of the erosion in "Pisha" sandstone area, southern Inner Mongolia[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2004, 25(6): 659-664.
石迎春, 叶浩, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报, 2004, 25(6): 659-664.
- [17] Ye Hao, Shi Jiansheng, Hou Hongbing, *et al.* Effect of the lithologic characters of Pisha sandstone on gravity erosion in south Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2008, 25(3): 402-405.
叶浩, 石建省, 侯宏冰, 等. 内蒙古南部砒砂岩岩性特征对重力侵蚀的影响[J]. 干旱区研究, 2008, 25(3): 402-405.
- [18] Ye Hao, Shi Jiansheng, Wang Guiling, *et al.* Effect of chemical compositions of Pisha sandstone on the gravity erosion [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 5-9.
叶浩, 石建省, 王贵玲, 等. 砒砂岩化学成分特征对重力侵蚀的影响[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 5-9.
- [19] Ye Hao, Shi Jiansheng, Li Xiangquan, *et al.* The effect of soft rock lithology upon its anti-erodibility[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(2): 145-150.
叶浩, 石建省, 李向全, 等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报, 2006, 27(2): 145-150.
- [20] Li Changming, Song Lisha, Wang Lijiu. Mineral composition and anti-erodibility of Pisha sandstone[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(2): 11-16.
李长明, 宋丽莎, 王立久. 砒砂岩的矿物成分及其抗蚀性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 11-16.
- [21] Zhang Pengyue, Zhang Jie, Zhang Xiaolei, *et al.* Preparation and experimental research of grapheme coated bimetallic nanoparticles used as substrates[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(3): 0306003.
张朋月, 张洁, 张晓蕾, 等. 石墨烯/双金属纳米颗粒基底的制备及实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(3): 0306003.
- [22] Schmidt C, Ziemann M A. *In-situ* Raman spectroscopy of quartz: a pressure sensor for hydrothermal diamond-anvil cell experiments at elevated temperatures[J]. American Mineralogist, 2000, 85(11/12): 1725-1734.
- [23] Jayaraman A, Wood D L, Maines R G. High-pressure Raman study of the vibrational modes in AlPO₅ and SiO₂ (α -quartz)[J]. Physical Review B, 1987, 35(16): 8316-8321.
- [24] Chakraborty B, Bera A, Muthu D V S, *et al.* Symmetry-dependent phonon renormalization in monolayer MoS₂ transistor[J]. Physical Review B, 2012, 85(16): 396-404.
- [25] Hu P P, Liu J, Zhang S X, *et al.* Raman investigation of lattice defects and stress induced in InP and GaN films by swift heavy ion irradiation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, 2016, 372: 29-37.
- [26] Tang Jianjun, Liang Ting, Xiong Jijun, *et al.* Analysis of stress-testing using Raman spectra on heteroepitaxy Si/GaN [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(8): 083002.
唐建军, 梁庭, 熊继军, 等. 异质外延 Si/GaN 应力状态的拉曼光谱测试分析[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(8): 083002.
- [27] Xie Chao, Zhou Bengang, Du Jianguo, *et al.* Characteristics of Raman spectra of minerals in gouge of the Wenchuan earthquake fault zone[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(6): 1562-1565.
谢超, 周本刚, 杜建国, 等. 汶川地震断裂带断层泥矿物拉曼光谱特征[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(6): 1562-1565.