

改性纤维素类固沙材料对草本植物出苗率及幼苗生长的影响

袁进科, 陈杰

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘要: [目的] 研究新型固沙材料与 5 种典型草本植物的相容性影响, 为九寨沟景区震后生态恢复重建提供理论依据。[方法] 基于改性纤维素类新型固沙材料和典型草本植物, 利用基质吸力分析、植被模拟分析和相关统计等方法, 探讨不同配比方式的固沙材料与草本植物的相容性机理。[结果] 固沙材料基质吸力最终稳定在 80 kPa 左右, 可以给植物根系生长提供稳定的供水环境; 灯笼草和唐松草在两种配比的固沙材料中均有出苗, 说明这两种植物与固沙材料相容性良好, 从出苗率分布看, 唐松草 > 灯笼草 > 金线草、茜草、夏枯草, 其中唐松草出苗率达到 30%; 1:3 液固质量比的固沙材料含水率更高, 植物株苗存活时间更长; 种子出苗区域均位于固沙材料孔隙较大的位置。[结论] 新型固沙材料基质吸力最终在 80 kPa 以内, 1:2 配比固沙材料的唐松草出苗率为 30%, 灯笼草平均根径达到 2 mm, 同时具有一定孔隙的固沙材料更适宜植物幼苗生长。

关键词: 沙土; 改性纤维素; 固沙剂; 草本植物; 出苗率

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)03-0268-06

中图分类号: S157, Q945.3

文献参数: 袁进科, 陈杰. 改性纤维素类固沙材料对草本植物出苗率及幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 268-273. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.039; Yuan Jinke, Chen Jie. Effects of modified cellulose polymer sand-fixing material on emergence rate and seedling growth of herbaceous plants [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 268-273.

Effects of Modified Cellulose Polymer Sand-Fixing Material on Emergence Rate and Seedling Growth of Herbaceous Plants

Yuan Jinke, Chen Jie

(State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: [Objective] The compatibility impacts of new sand-fixing materials on five typical herbaceous plants were studied to provide a theoretical basis for the ecological restoration and reconstruction of the Jiuzhaigou scenic area after an earthquake. [Methods] Based on the new sand-fixing materials of modified cellulose and typical herbaceous plants, matric suction analysis, vegetation simulation analysis, and relevant statistics were used to study the compatibility mechanism between sand-fixing materials of different proportions and herbaceous plants. [Results] The matrix suction of the sand-fixing material was stabilized at approximately 80 kPa, which could provide a stable water supply environment for plant root growth. *Physalis alkekengi* and *Thalictrum aquilegifolium* had germinated in two kinds of sand-fixing material, indicating that these two plants had good compatibility with the sand-fixing materials. From the distribution of the germination rate, *T. aquilegifolium* > *P. alkekengi* > *Rubia membranacea*, *Rubia cordifolia*, *Prunella vulgaris*, the germination rate of *T. aquilegifolium* reached 30%. A 1:3 liquid-solid mass ratio of sand-fixing material had a higher water content, and plant seedlings survived longer. The germination area of the seeds was at a position where the pores of the sand-fixing material were large. [Conclusion] The final matric suction of new

收稿日期: 2020-02-15

修回日期: 2020-04-11

资助项目: 国家自然科学基金项目“纤维素类固化剂加固砂土边坡作用机理及抗冲蚀效应研究”(41702318); 四川省国土资源厅项目“新型高聚物生态护坡材料与植被加固工艺研究”(KJ-2018-25)

第一作者: 袁进科(1982—), 男(汉族), 四川省泸州市人, 博士, 主要从事环境地质及生态加固方面的研究。Email: yuanjingke@163.com.

sand-fixing material was within 80 kPa, the emergence rate of *T. aquilegifolium* with a 1:2 ratio of sand-fixing material was 30%, the average root diameter of *P. alkekengi* was 2 mm, and the sand-fixing materials with a certain porosity were more suitable for the growth of plant seedlings.

Keywords: sandy soil; modified cellulose polymers; sand-fixing material; herbaceous plant; emergence rate

当前,美国、澳大利亚、英国等发达国家已将生态环境问题提升到了国家战略规划高度^[1-2]。其中生态环境问题包括水土流失、污染、沙化、生物多样性减少等,主要是水土流失问题^[3-4]。中国是世界上水土流失最严重国家之一,全国水土流失面积达 2.74×10^6 km²,占国土面积的 28.5%^[5]。并且由于地震引发的次生地质灾害也极易引起水土流失,比如在汶川大地震震后 3 a 内地震灾区较震前新增水土流失面积达到 1.48×10^4 km²,增幅达 11%,其中重灾区的增幅更达到 30%^[6]。2017 年 8 月 8 日,四川省九寨沟发生的 7 级地震引发地质灾害 1 000 余处,在遇到连续降雨的时候也极易引起水土流失。防治水土流失危害的措施主要包括植物固沙措施、工程固沙措施和化学固沙措施等 3 大类^[7]。其中工程固沙和植物固沙技术比较成熟,但这些防治技术存在高成本、低效益、劳动强度大、施工进度慢等问题^[8]。在这 3 大类基础上,为了达到既防止水土流失还可以恢复生态、改善环境的同时还能追求高效、廉价及快速,发展了“化学—生物”固沙综合技术。“化学—生物”固沙技术利用固沙剂与植物生长的适宜性更好地发挥固沙作用,具有高效廉价、快速方便、环境协调的特点^[9]。通过“化学—生物”固沙技术在为植物创造良好生长环境的同时,能逐渐改善生态环境,形成自然生态圈^[10]。譬言勤等^[11]利用高岭土和聚丙烯酰胺(PAM)制备的固沙剂具有吸水保水性,抗旱助长性。夏海江^[12]针对沙土的抗风蚀性能做了简易风洞试验,研究结果表明聚丙烯酰胺类胶凝材料可以改善沙土的抗风蚀能。王银梅等^[13]针对沙土类地层特点研究了 SH 固沙剂的固沙性能,固沙效果优异且可控,耐久性能优良。王勇等^[14]研究了新型固沙植被多功能高分子复合材料,与沙土混合吸水后形成团粒结构,改善沙土结构的物理性状。谭雪琴等^[15]研究了以聚乙烯醇为原料制备的固沙剂,固沙效果稳定,并提升了分子链间的作用力,但该固沙剂的固沙强度不高。梁止水等^[16]通过改性水溶聚氨酯(W-OHC)固沙后的渗透性、固沙层的强度以及保水性等方面研究,大大提高了沙粒间的胶结力。申闰春等^[17]研制了丙烯酰胺改性羟丙基纤维素钠的固沙剂,固沙保水效果较好。本研究采用化学固沙与生物固沙相结合的综合防治技术,以九寨沟地震震后松散的沙土边坡为研究对象,利用羧甲基纤维素钠(CMC)材料为基础并结合聚丙

烯酰胺(PAM)材料研发的改性纤维素类固沙剂(GCMC)为固沙材料,分别采用九寨沟不同类型草本植物和不同配比固沙材料进行草本植物出苗率及幼苗生长状况的研究,对 GCMC 固沙材料内部的基质吸力进行分析,探讨不同配比方式的固沙材料试验的植物相容性机理,以期为后续进行现场固沙植草模拟试验提供科学数据,进一步为九寨沟地震受损边坡植被恢复提供研究基础。

1 研究区概况

2017 年 8 月 8 日在四川省九寨沟发生 7.0 级地震,是继 2008 年汶川大地震和 2013 年芦山地震之后,四川省发生的又一次 7.0 级以上的强震。地震引发的地质灾害一千余处,主要以中小型浅层滑坡和崩塌为主。这类地质灾害产生了大量的松散颗粒物质,在遇到降雨的时候极易引起坡表水土流失。研究区内的斜坡坡度集中在 30°~40°之间,降雨作用到斜坡坡表的接触面积较大,从而易于形成地表径流,对坡面造成直接冲刷,造成坡面水土流失的加剧。

2 材料与方法

2.1 改性纤维素类固沙材料作用机理

试验所用改性纤维素类固沙剂(GCMC)由 CMC 和 PAM 两种有机高分子材料组成,配制成 1.1% 的浓度,呈液态,pH 值为 6~7,密度为 1.01 g/cm³,黏度为 78 m Pa·s,无毒无公害,具有吸附能力强、持水性良好等优点,属于绿色环保化学品^[18]。GCMC 固沙剂中羟基和羧甲基(-CH₂COONa)等官能团中的氢键与沙土颗粒表面的 Si-OH、Mg²⁺、Ca²⁺ 等游离的阳离子通过交联、吸附发生络合反应形成结构体分布在固/液界面上。GCMC 固沙剂分子链上丰富的羧基和羟基使其易形成不溶于水的水凝胶,同时胶体三维网状结构对离子具有保蓄能力,且具有很大的内外表面积,这些性质决定了 GCMC 固沙剂具有较高的离子交换量和很强的吸附能力。

2.2 试验材料

改性纤维素类固沙剂(GCMC)与沙土按照不同的质量配比形成固沙材料。所选用的沙土取自九寨沟发生水土流失的松散斜坡坡表,将沙土风干以后得

到沙土颗粒的粒径分布(见表 1),其中颗粒粒径主要集中在 1.5~0.5 mm 之间。

表 1 试验沙土的粒径级配

材料	不同粒径沙土(mm)颗粒比例/%					
	>2	2~1.5	1.5~1	1~0.5	0.5~0.1	<0.1
沙土	13	15	24	22	18	8

2.3 试验仪器

本次试验中材料基质吸力测试采用的是 TEN 土壤张力计,测试范围 0~100 kPa。

2.4 植物选择

试验用的草本植物为 5 种,分别是灯笼草 (*Physalis alkekengi*),金线草 (*Rubia membranacea*),茜草 (*Rubia cordifolia*),唐松草 (*Thalictrum aquilegifolium*)和夏枯草 (*Prunella vulgaris*),均选自于九寨沟景区内的代表性草本植物^[19]。其中灯笼草为唇形科风轮菜属植物,直立多年生草本,适宜发芽温度在 20~22 ℃;金线草为蓼科植物,适宜发芽温度在 2~23 ℃;茜草为多年生草质攀援藤木,唐松草和夏枯草均为多年生草本植物,这 3 种植物适宜发芽温度在 25 ℃。

2.5 试验方法

试验于 2019 年 7 月开始进行,室温控制在 22~25 ℃。选用 40 cm×30 cm×15 cm 的塑料盘,每个塑料盘重 200 g,并在盘内放入 3 000 g 沙土后摊平,厚度约 7 cm(见图 1)。结合在前期试验过程中,固沙剂与沙土采用了 1:1^[20]和 1:3^[21]的液固质量比进行了强度和耐水性试验,固沙效果显著。因此结合前期试验,首先将改性纤维素类固沙剂与沙土按照 1:2 和 1:3 的液固质量比分别配制成固沙材料,呈塑性状态,然后按照不同液固质量比配制的固沙材料分成两个试验区(A 区和 B 区),每个试验区均有 5 个塑料盘,再分别选取 5 种植物种子各 20 粒分别均匀撒在 5 个塑料盘内的沙土表面,每个塑料盘内代表 1 种植物,均匀分布 20 粒植物种子,5 种植物共 100 粒种子。最后将拌和好的 1:2 液固比的固沙材料约 1 cm 厚覆盖在 A 区塑料盘沙土上,1:3 液固比的固沙材料约 1 cm 厚覆盖在 B 区塑料盘沙土上,形成约 1 cm 厚的固沙结构层(见图 2),将张力计插入到固沙材料中以观测材料的基质吸力变化。沙土的含水率约为 17.64%,室温中温度在 22 ℃左右。试验时间 60 d,每隔 3 d 往每个塑料盘内均匀喷洒 50 ml 自来水,记录植物生长情况。



图 1 试验选取的沙土



图 2 铺设的固沙材料

3 结果与分析

3.1 固沙材料基质吸力分析

植物的生长离不开水,土体持水能力也是边坡稳定性评价时重点考虑的因素。因此固沙材料不仅要有较强的防水冲刷能力,而且还要有一定保水性可以给植物根系提供水分。材料的吸水能力通过基质吸力表示,在相同含水量下,水吸力越小说明保持的水分越多,表征其对沙土体改良的作用就越好。

从图 3 可以看出,液固质量比为 1:2 的固沙材料基质吸力明显大于 1:3 液固质量比,同时 1:2 液固质量比的固沙材料从第 3 d 开始就表现出吸水特征,说明 1:2 液固质量比的固沙材料持水能力差、含水率低,所以表现出更强的吸水特征。田间作物适宜的土壤吸力大多在 90 kPa 以内^[22]。通过试验,两种液固质量比的固沙材料基质吸力最终稳定在 80 kPa 和 75 kPa,可以给植物根系生长提供稳定的供水环境,避免因吸力过大从而掠夺植物根系生长所需的水分。并且 1:3 液固质量比的固沙材料基质吸力更小,说明 1:3 比例的固沙材料含水率更高,可以给植物提供更多的水分。

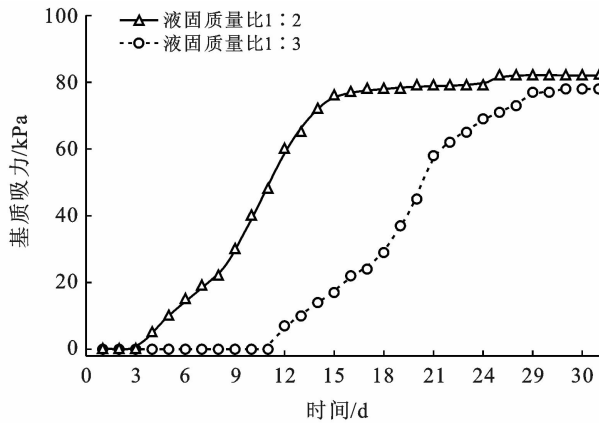


图 3 不同液固质量比固沙材料基质吸力随时间变化特征

3.2 植物出苗率分析

不同草种的出苗率试验结果见表 2。从两种试

表 2 不同植物种子出苗率分布特征

试验区	植物	出苗率/%	平均根长/mm	平均根径/mm	平均株高/mm	存活时间/d
A 区	灯笼草	5	20	2	70	20
	唐松草	30	14	1	26	34
	金线草、茜草、夏枯草	—	—	—	—	—
B 区	灯笼草	5	17	2	60	29
	唐松草	10	13	0.5	25	40
	金线草、茜草、夏枯草	—	—	—	—	—

施用一定量的固沙材料改变了沙土的密实度,适宜的施用量可以促进作物根系的穿孔和生长^[9]。植物种子主要是从固结层孔隙较大的地方出苗,而紧密的地方种子出苗难(见图 4),说明植物种子出苗不仅需要水分,还需要适宜的空间。从表 2 可以看出灯笼草的出苗率较低,只有 5%,说明种子发芽难度较大。从出苗率分布看,唐松草>灯笼草>金线草、茜草、夏枯草。配制的固沙材料强度在 850~915 kPa,孔隙率在 41%~44%,渗透系数为 $1.1\sim 2.5\times 10^{-6}$ 。虽然固沙材料固然胶结程度高、强度大,其抗水流冲刷的能力强,但是压实紧密的固结层也会压缩种子空间,使得植物出苗困难,所以适当配比的固沙材料不仅需要具有一定的抗水冲刷和保水能力,同时也需要给植被发育提供一定空间。同时化学固沙材料可吸附和固定沙层中的有机物离子,通过与植物进行离子交换作用提供给植物所需的营养物质^[24]。从表 2 可以看出 B 区植物的幼苗存活时间都多于 A 区植物,其中唐松草多存活了 6 d,灯笼草多存活了 9 d,说明 1:3 液固质量比的固沙材料含水率更高,可以给种子发芽提供更多的水分,存活时间更长。同时对比试验结果,植物种子总体上出苗率低于 30%,存活时间小于 40 d,说明在实验室条件下,光照以及通风受到了一

定限制,同时实验室内的电气设备也会近距离造成植物因环境变化太过明显而造成的生长不适。因此植物需要充足的光照和通风条件才能充分进行光合作用,同时也要免受电器设备造成的环境影响。

验区的植物出苗率分布可以看出,灯笼草和唐松草均有出苗,说明这两种植物适宜生长,而金线草、茜草和夏枯草在两种试验区内均未见出苗。其中 A 试验区的植物出苗率整体比 B 试验区植物出苗率高,A 区灯笼草出苗率和 B 区一样,均为 5%;A 区唐松草出苗率为 30%,B 区为 10%。

植物的出苗率跟土体的强度、孔隙率、含水率以及团粒结构有很大关系^[23]。由于改性纤维素类固沙剂(GCMC)配制的固沙材料具有一定的强度,并且胶结程度较高。由表 2 可以看出,金线草、茜草和夏枯草这 3 类植物种子没有出苗。而灯笼草和唐松草发育较好,唐松草出苗率可以达到 30%,并且从灯笼草和唐松草根系和株苗的尺寸可以看出两者与固沙材料相容性好。

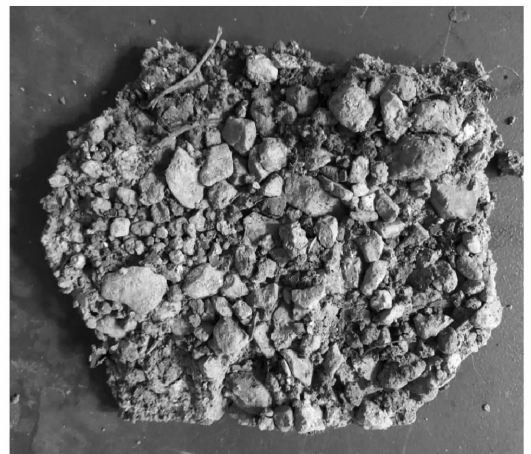


图 4 紧密的固结层

3.3 幼苗生长特征分析

从表 2 显示 A 区和 B 区的灯笼草平均根径一致,均达到 2 mm,同时从试验观察到灯笼草的叶片面积较大,达到 130 mm² 左右。根系的发达不仅有助

于其从沙土里吸收水分和养分,而且较大的叶片也有助于其获得充足的阳光。植物就是利用自身发达的根系,在沙土内水平或垂直发展来吸收深层水分和营养,以供应给植物地上部分的蒸腾和生长发育的需要。

图5为A区和B区的唐松草根部和株苗特征,可以看出两者的根部长尺寸相当,但是A区的根茎稍粗,达到1 mm。两者的株苗高度差不多,叶片面积也近似。从根系的形状来看,两者均属于向土壤深部延伸的主直根型。主直根型的特点是有一条明显的垂直主根,其上再发育有众多微细侧根,能很好的起到锚杆作用^[25]。两者的株高相当,约25 mm,说明种子具有更强的生命力可以穿透固沙材料出苗。但是A区的株苗枯萎的时间早,存活时间短。结合图4及试验过程观察,A区和B区的种子出苗区域均位于固沙材料孔隙较大的位置,说明具有一定孔隙的固沙材料更适宜植物幼苗的生长。

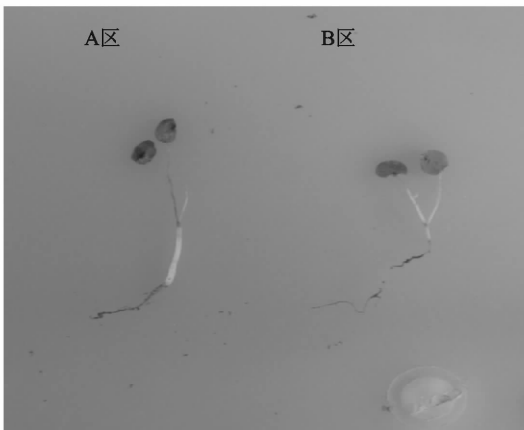


图5 唐松草生长根苗特征

从灯笼草和唐松草的出苗率分布和根苗特征分析,GCMC固沙材料和灯笼草以及唐松草的相容性较好,植物根系主根发达,但是侧根明显偏弱。同时大部分地区(尤其是中国南方区域)沙生类植物生长所需要的土壤环境一般是弱酸性,沙土过酸或过碱都会危害植物^[26]。改性纤维素类固沙剂的pH值为6~7,符合植物生长的弱酸性土壤环境条件,有利于植物的生长。并且GCMC固沙材料不仅具有一定结构强度可抗水流冲刷,而且还具有保水性,可促进植物生长。通过试验分析,九寨沟典型植物中灯笼草和唐松草与GCMC固沙材料相容性良好,在1:2液固质量比时唐松草出苗率更高,在液固质量比1:3时植物的存活时间更长。

4 结论

自主研发的改性纤维素类固沙剂易在水中溶解

分散形成胶状体,具有良好的持水性,属于绿色环保型固沙材料。固沙剂pH值在6~7之间,符合沙生植物生长的弱酸性土壤环境条件,有利于沙土中植物的生长。

液固质量比为1:2的固沙材料基质吸力大于1:3液固质量比,液固质量比为1:3的固沙材料持水性好,可以给植物提供更多的水分。两种液固质量比的固沙材料基质吸力最终为80 kPa和75 kPa,可以给植物根系生长提供稳定的供水环境,避免了因吸力过大从而掠夺植物根系生长所需的水分。

选取的5种典型九寨沟植物中,灯笼草和唐松草在两种配比固沙材料中均有出苗,而金线草、茜草和夏枯草在两种试验区内均未见出苗。A试验区的植物出苗率整体比B试验区植物出苗率高,A区灯笼草出苗率和B区一样,均为5%;A区唐松草出苗率为30%、B区为10%。同时B区植物的生长时间都长于A区植物。

A区和B区的灯笼草平均根径一致,均达到2 mm。A区和B区的唐松草平均根长和平均株高近似,但A区的根径稍粗,达到1 mm。同时A区和B区的种子出苗区域均位于固沙材料孔隙较大的位置,说明具有一定孔隙的固沙材料更适宜植物幼苗的生长。

[参 考 文 献]

- [1] Howes M, Wortley L, Potts R, et al. Environmental sustainability: A case of policy implementation failure? [J]. Sustainability, 2017,9(2):165.
- [2] Montanarella L, Vargas R. Global governance of soil resources as a necessary condition for sustainable development [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2012,4(5):559-564.
- [3] 唐克丽,史立人,史德明,等. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社,2004.
- [4] 彭珂珊. 我国水土保持在生态文明建设中的实践与思考 [J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2016,37(5): 58-69.
- [5] 刘佳,贺尧. 无人机遥感技术在水土保持方案编制工作中的应用[J]. 资源信息与工程,2019,34(6):69-71.
- [6] 熊明彪,胡恒,胡波. 四川汶川地震区新生水土流失现状与防治对策[J]. 中国水土保持,2011(4):24-26.
- [7] 梁柯鑫,王起才,崔晓宁,等. 格库铁路不同固沙措施的防护效益[J]. 水土保持通报,2018,38(5):300-306.
- [8] 严亮,杨久俊. 新型化学固沙材料的研究现状及其展望 [J]. 材料导报,2009,23(5):51-54.
- [9] 温学飞,张亚峰. 化学固沙剂对柠条出苗影响的研究 [J]. 宁夏农林科技,2013,54(3):18-21.

- [10] 庞营军,屈建军,陈怀顺,等.雅鲁藏布江江当宽谷区固沙措施对流沙理化性质的改良效应[J].水土保持通报,2016,36(6):67-72.
- [11] 訾言勤,陆丽园,余锦照.新型多功能固沙剂的试验研究[C]//2007中国科协年会论文集.武汉,2007:2714-2717.
- [12] 夏海江.聚丙烯酰胺改善沙土抗风蚀性能试验研究[J].中国水土保持,2005(2):4-5.
- [13] 王银梅,谌文武,韩文峰.新型高分子材料固沙抗风蚀的风洞模拟实验[J].水土保持学报,2005,19(6):12-14.
- [14] 王勇,王康,小島纪德.固沙植被多功能高分子复合材料对沙土物理性状的影响[J].水土保持学报,2009,23(1):141-144.
- [15] 谭雪琴,宋茂林,刘秀珍.新型化学固沙剂的试验研究[J].山西交通科技,2005(5):3-6.
- [16] 梁止水,吴智仁.改性水溶性聚氨酯的固沙促生性能及其机理[J].农业工程学报,2016,32(22):171-177.
- [17] 申闫春,杨献青,王芳辉,等.丙烯酸胺改性羟丙基纤维素钠固沙剂的性能与环境影响分析[J].环境与发展,2018,30(10):26.
- [18] 袁进科,裴向军,叶长文,等.改性纤维素类聚合物固沙剂的吸附力学及崩解特性试验[J].农业工程学报,2019,35(21):144-150.
- [19] 刘玉成,方任吉,周保桐.九寨沟自然保护区种子植物区系组成分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),1991,16(4):471-478.
- [20] 裴向军,罗阳楚君,杨晴雯.含水率及掺砂量对双聚材料改良碎石土性能的影响[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2018,37(9):48-52.
- [21] 裴向军,杨晴雯,许强,等.改性钠羧甲基纤维素胶结固化土质边坡机制与抗冲蚀特性研究[J].岩石力学与工程学报,2016,35(11):2316-2327.
- [22] 丁新原,张广宇,周智彬,等.咸水滴灌条件下塔里木沙漠公路防护林土壤水分物理性质[J].水土保持学报,2015,29(1):250-256.
- [23] 黄培祐,向斌,李启剑,等.入夏前梭梭实生苗生长动态与生境的关系[J].中国沙漠,2009,29(1):87-94.
- [24] 马晓芳,铁生年.青海湖沙化地区石膏固沙植生复合材料植物相容性效果试验[J].材料导报,2015,29(18):94-99.
- [25] 程磊.植物根系加固边坡作用试验研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018.
- [26] 李从娟,马健,李彦.五种沙生植物根际土壤的盐分状况[J].生态学报,2009,29(9):4649-4655.

(上接第267页)

- [6] Kumari A, Sharma A K. Physical & social infrastructure in India & its relationship with economic development [J]. World Development Perspectives, 2017, 5: 30-33.
- [7] 钱家骏,毛立本.要重视国民经济基础结构的研究和改善[J].经济管理,1981(3):12-15.
- [8] 唐建新,杨军.基础设施与经济发展:理论与政策[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [9] 许迅安.基础设施结构对商贸流通业发展的影响[J].商业经济研究,2019(19):22-24.
- [10] 米冰.城市基础设施的空间溢出效应与全要素生产率关系分析[J].商业时代,2014(28):59-60.
- [11] 赵楠,申俊利,贾丽静.北京市基础设施承载力指数与承载状态实证研究[J].城市发展研究,2009,16(4):68-75.
- [12] 康红梅,徐苏宁.城市基础设施承载力与城市规模的互馈研究[J].四川建筑科学研究,2012,38(5):325-328.
- [13] 张伟芳,杨永春,金建玲,等.甘肃省城市基础设施建设水平评价[J].资源与产业,2015,17(5):88-95.
- [14] 尹凡,刘明.京津冀区域城镇化推进政策着力点分析:基于基础设施承载力和公共服务承载力的对比[J].城市发展研究,2017,24(11):10-13.
- [15] 姚鸿韦.“一带一路”基础设施建设投融资与经济增长思考:基于历史视角[J].现代管理科学,2018(2):75-77.
- [16] 张博文.城市基础设施承载力评价:以兰州市为例[J].开发研究,2018(2):136-141.
- [17] 孙喆,蔡文婷.县城市政基础设施供给充分与平衡性评价:以湖南省为例[J].城市发展研究,2019,26(2):92-99.
- [18] 史富文.城市基础设施发展水平评价研究[J].工程经济,2019,29(12):64-68.
- [19] 李东序.城市综合承载力理论与实证研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [20] 陈金英,杨青山,马中华.不同发展阶段的城市群综合承载能力评价研究[J].经济地理,2013,33(8):68-72.
- [21] 董丽.基于综合承载能力分析的区域发展战略研究[D].天津:天津大学,2010.
- [22] 邓俊,徐琬莹,周传斌.北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究[J].环境科学,2013,34(1):395-400.