

DOI: 10.5846/stxb201811252549

丁新辉,刘孝盈,刘广全,朱毕生,王炜炜.京津风沙源区沙障固沙技术评价指标体系构建.生态学报,2019,39(16): - .  
Ding X H, Liu X Y, Liu G Q, Zhu B S, Wang W W. Establishing evaluation index system for sand-barrier technologies in Beijing-Tianjin sand source regions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): - .

## 京津风沙源区沙障固沙技术评价指标体系构建

丁新辉<sup>1,2</sup>, 刘孝盈<sup>1,2,\*</sup>, 刘广全<sup>1,2</sup>, 朱毕生<sup>1</sup>, 王炜炜<sup>3</sup>

1 中国水利水电科学研究院,北京 100038

2 国际泥沙研究培训中心,北京 100048

3 北京林森生态环境技术有限公司,北京 100085

**摘要:**由于构成材料、规格形状以及自然风向和地貌形态的多样性,不同沙障固沙技术的固沙效果有较大差异,如何科学客观的筛选沙障固沙技术,是保证沙障固沙技术长期稳定发挥其最大作用的重要基础。针对京津风沙源区沙障固沙技术效果评价问题,建立了沙障固沙技术评价的方法体系,明确了沙障固沙技术评价指标集、评价指标权重以及沙障固沙技术评价面临的问题。在沙障固沙技术与地区自然条件、经济发展水平相协调的前提下,基于文献频次法和层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)从技术成熟度、技术应用难度、技术相宜性、技术效益、技术推广潜力 5 个方面共筛选出 1 项判断性指标、4 项准则性指标、14 项二级指标和 25 项三级指标指标,构建沙障固沙技术评价指标体系。该指标体系以技术效益为主导,兼顾功能性和应用性综合评价,从而对京津风沙源区沙障固沙技术进行全面评价。

**关键词:**沙障固沙技术;层次分析法;文献频次法;指标权重

## Establishing evaluation index system for sand-barrier technologies in Beijing-Tianjin sand source regions

DING Xinhui<sup>1,2</sup>, LIU Xiaoying<sup>1,2,\*</sup>, LIU Guangquan<sup>1,2</sup>, ZHU Bisheng<sup>1</sup>, WANG Weiwei<sup>3</sup>

1 China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China

2 International Research and Training Centre on Erosion and Sedimentation, Beijing 100048, China

3 Beijing Linmiao Ecological Environment Technology co. LTD, Beijing 100085, China

**Abstract:** Due to the diversity of materials, specifications and shapes, the natural wind directions and landforms, the sand-fixing effects of different sand-barrier technologies are quite different. The scientific and objective screening methods of sand-barrier technology are an important basis for ensuring the sand-fixing technology to play its maximum role in a long-term and stable way. Aiming at the effect evaluation for sand-barrier technologies in the Beijing and Tianjin sand source regions, an evaluation system of sand-barrier technologies was established in this paper. We also defined the evaluation indexes and its weight, clarified the problems faced by the evaluation of sand barrier. Under the premise of sand-barrier technologies in harmony with the natural conditions, economic development and based on literature frequency method and analytic hierarchy process (AHP), the evaluation index system of sand-barrier technologies were screened from technology maturity, technology application difficulty, technology suitability, technology benefit, technology promotion potential 5 aspects. The final evaluation index system consisted of one index of judgment layer, four indexes of criterion layer, 14 indexes of indicator layer, and 25 indexes of sub-indicator layer. The index system, taking the technology benefit as the leading factor and considering the comprehensive evaluation of function and application, was used to carry out the full evaluation of sand-barrier technologies in the Beijing and Tianjin sand source regions.

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题(2016YFC0503704, 2016YFC0501705, 2016YFC0501602)

收稿日期:2018-11-25; 网络出版日期:2019-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuxy@iwhr.com

**Key Words:** sand barrier technology; analytic hierarchy process; literature frequency method; index weight

近年来,沙障固沙技术在治沙领域迅速发展<sup>[1-2]</sup>,其使用的材料包括各类农作物秸秆、各种沙生植物、粘土、砾石以及新型化学材料等<sup>[3-6]</sup>。由于障高、孔隙度和设置形状的不同,所形成的沙障种类繁多,主要包括:高立式沙障、近地式沙障、平铺式沙障;通风型沙障、疏透型沙障、紧密型沙障;网格沙障、带状沙障<sup>[7-10]</sup>。马青江等认为针对不同的材料及设置方式,各技术的固沙能力、经济效益以及有效年限等也不尽相同<sup>[11]</sup>。实际上影响沙障防风效应的因素很多,沙障的材料、规格以及抗腐性能都是重要的因素,此外沙障的组合、主风方向、地貌形态等也会产生一定影响,由此可见,沙障固沙技术的评价是在动态条件下进行的多因素复杂决策过程。

大部分现有研究主要关注沙障固沙技术固沙效应的几个方面,如起沙风速、地表粗糙度、输沙率、土壤含水率、植被成活率等,缺乏全面性,不能够系统地评估沙障固沙技术的固沙效应。目前,国内学者对沙障固沙技术的评价方法主要有比较分析法<sup>[12]</sup>、效益评价法<sup>[13]</sup>,尚缺乏一套科学、系统的评价指标及计算方法,导致不能有效地对沙障固沙技术进行评价,从而阻碍京津风沙源区沙障固沙技术的推广。本文在梳理国内外研究中有关沙障固沙技术评价指标的基础上,对沙障固沙技术的相关指标进行科学筛选,建立沙障固沙技术评价指标体系,以期为京津风沙源区沙障固沙技术的评价提供科学依据。

## 1 评价指标选取的原则

基于客观性、代表性、可操作性、完整性的原则,本研究系统的构建了一套沙障固沙技术评价指标体系,并对其评价指标的选取进行了系统研究和论述,为沙障固沙技术的评价和筛选提供了可行性方法,也为沙漠化地区治沙技术集成与推广提供支撑。评价工作以促进沙障固沙技术科学设计和规范化应用为目标,引导治沙技术向提高环境社会效益方向发展。通过查阅大量文献梳理出机械沙障和生物沙障效果评价指标(表1),其中机械沙障效果评价指标21项,生物沙障效果评价指标24项<sup>[14-24]</sup>。机械沙障更偏重于防风固沙效果,而生物沙障则注重植被的生长情况,二者对土壤理化性质均有改良作用。在实际应用中,通常采用两种沙障相结合,才能取得较好的治沙效果。因此,在对沙障固沙技术进行评价时,选取评价指标应有所兼顾。此外,随着社会经济等环境因素的变化,需要对评价指标进行相应的调整。

表1 各类机械沙障和生物沙障效果评价指标

Table 1 Effectiveness valuation indicators for various mechanical and biological sand barriers

沙障类型 Sand barrier type	定义 Defination	亚类 Sub-type	效果评价指标 Effectiveness evaluation index
机械沙障 Mechanical sand-barrier	以土、柴草等死体材料设置的挡风阻沙的障碍物	秸秆沙障	防风效能(16)、输沙率(13)、粗糙度(11)、土壤含水量(9)、土壤平均粒径(6)、障体耐蚀积能力(5)、时效性(5)、风蚀深度(5)、土壤理化性质(5)、风速廓线(4)、设置成本(4)、积沙深度(4)、最适孔隙度(3)、防风固沙(3)、破损率(2)、土壤盐分(1)、pH值(1)、土壤湿度(1)、受沙害面积(1)、沙障高(1)、温度(1)
		粘土沙障	
		尼龙网沙障	
		塑料沙障	
		沥青毡沙障	
		土工布沙障	
		砾石沙障	
		污泥沙障	
		聚酯纤维沙障	
		高密度聚乙烯沙障	
生物沙障 Biological sand-barrier	以旱生灌木和沙生草本植被等活体材料设置的防风阻沙的障碍物	黄柳沙障	成活率(8)、高生长量(7)、植被覆盖度(4)、物种多样性(4)、地表粗糙度(3)、产投比(3)、冠幅(3)、抗病虫害(3)、起沙风速(2)、输沙率(2)、保存率(2)、沙丘移动距离(2)、适用范围(1)、使用年限(1)、分枝数(1)、根系扩展(1)、抗逆性(1)、破损率(1)、土壤理化性质(1)、机械组成(1)、物种结构(1)、地径(1)、阻沙粒度(1)
		杨柴沙障	
		踏郎沙障	
		沙柳沙障	
		柠条沙障	
		拐枣沙障	
		红柳沙障	
		白刺沙障	
紫穗槐沙障			

括号内表示该词在文献中出现的频次

## 2 京津风沙源区沙障固沙技术评价体系

### 2.1 评价指标确定

沙障固沙技术评价既应包含技术体系以及实施条件,又要注重技术的适应性和效果<sup>[25]</sup>,因此本文从技术成熟度、技术应用难度、技术相宜性、技术效益和技术推广潜力 5 个方面对沙障固沙技术进行评价。其中技术相宜性为判断性指标,即从治理目标、立地条件、经济条件和政策法律角度综合评价沙障固沙技术的相宜性,只有待评价技术满足相宜性时才成为评价对象<sup>[26]</sup>(表 2)。然后从技术成熟度、技术应用难度、技术效益和技术推广潜力 4 个准则性指标评价沙障固沙技术(表 3)。由于技术相宜性评价体系为定性评价,因此沙障固沙技术准则性指标体系要以定量指标为主<sup>[27]</sup>。通过进一步比较影响沙障防风效益、改土效益、植被恢复和小环境效益的指标,共筛选出防风效能、地表粗糙度、输沙率、专利含有量、设置成本、破损率、土壤粒度、表土含水率、植被覆盖度、成活率、产投比等 10 项定量指标。

表 2 沙障固沙技术判断性指标评价体系

Table 2 Evaluation system of judgement index of sand barrier technologies

一级指标 Primary indexes	二级指标 Secondary indexes	三级指标 3-level indexes	性质 Nature
技术相宜性 S Technical suitability S	目标适宜性 S <sub>1</sub>	生态目标的有效实现程度 s <sub>1</sub>	定性指标
		经济目标的有效实现程度 s <sub>2</sub>	定性指标
		社会目标的有效实现程度 s <sub>3</sub>	定性指标
	立地适宜性 S <sub>2</sub>	地形条件适宜性 s <sub>4</sub>	定性指标
		气候条件适宜性 s <sub>5</sub>	定性指标
	经济发展适宜性 S <sub>3</sub>	技术与产业关联程度 s <sub>6</sub>	定性指标
		技术经济发展耦合协调度 s <sub>7</sub>	定性指标
	政策法律适宜性 S <sub>4</sub>	政策配套程度 s <sub>8</sub>	定性指标
		法律配套程度 s <sub>9</sub>	定性指标

表 3 沙障固沙技术准则性指标评价体系

Table 3 Evaluation system of criterion indexes of sand barrier technologies

一级指标 Primary indexes	二级指标 Secondary indexes	三级指标 3-level indexes	性质 Nature	
技术成熟度 I <sub>1</sub> Technical maturity I <sub>1</sub>	技术完整性 I <sub>11</sub>	技术结构 i <sub>1</sub>	定性指标	
		技术体系 i <sub>2</sub>	定性指标	
	技术稳定性 I <sub>12</sub>	破损率 i <sub>3</sub>	定量指标	
		技术先进性 I <sub>13</sub>	专利含有量 i <sub>4</sub>	定量指标
技术应用难度 I <sub>2</sub> Difficulty of technology application I <sub>2</sub>	技能水平需求 I <sub>21</sub>	专业技术人员需求度 i <sub>5</sub>	定性指标	
		技术应用成本 I <sub>22</sub>	设置成本 i <sub>6</sub>	定量指标
技术效益 I <sub>3</sub> Technical efficiency I <sub>3</sub>	生态效益 I <sub>31</sub>	地表粗糙度 i <sub>7</sub>	定量指标	
		土壤粒度 i <sub>8</sub>	定量指标	
		表土含水率 i <sub>9</sub>	定量指标	
		植被覆盖度 i <sub>10</sub>	定量指标	
		成活率 i <sub>11</sub>	定量指标	
		经济效益 I <sub>32</sub>	产投比 i <sub>12</sub>	定量指标
		社会效益 I <sub>33</sub>	防风效能 i <sub>13</sub>	定量指标
技术推广潜力 I <sub>4</sub> Potential of technology promotion I <sub>4</sub>	生态建设需求度 I <sub>41</sub>	输沙率 i <sub>14</sub>	定量指标	
		技术与未来发展关联度 i <sub>15</sub>	定性指标	
		技术可替代性 I <sub>42</sub>	技术可替代性 i <sub>16</sub>	定性指标

有关准则性指标各个三级指标的描述如下:

技术结构 指构成技术的要素的完整性。根据有无主体技术通过 0—4 评分标准划分等级,具体评分为:

0-无主体技术;1-该技术构成要素缺失较多;2-该技术构成要素有一定的完整性;3-该技术构成要素比较完整;4-该技术构成要素完整。

**技术体系** 指各种技术之间的相互关系,按主体技术和配套技术的完整程度划分 0—4 评分等级,具体评分为:0-无配套技术;1-该主体技术有配套技术,但均不完整;2-该主体技术有配套技术,但不完整;3-该主体技术和配套技术均比较完整;4-该主体技术和配套技术完整。

**破损率** 沙障的破损率是评价各类沙障稳定性的有效指标。沙障布设后,由于自然因素(日照、风沙、动物损毁等)的影响,各种沙障出现了不同程度的破损,按不同的时间节点进行调查记录,得出各种沙障固沙技术的破损情况<sup>[28]</sup>。

**专利含量** 指与各种沙障固沙技术相关的专利的数量,表征技术先进性程度。

**专业技术人员需求度** 布设每种沙障所需人员的技能水平。技术水平越低,技术应用难度也越低。根据是否需要专业技术人员通过 0—4 评分标准划分等级,具体评分为:0-无需专业技术人员;1-该技术实施需要很少专业技术人员;2-该技术实施需要一定的专业技术人员;3-该技术实施需要较多专业技术人员;4-该技术实施需要大量专业技术人员。

**设置成本** 包括工程实施中的设置材料费、人工费、维护费用。

**地表粗糙度** 地表粗糙度指下垫面平均风速为零时的高度( $Z_0$ ),是反映地表对风阻抗能力的主要参数<sup>[29]</sup>。一般认为下垫面越粗糙,零风速出现的高度越高。通过下列公式确定粗糙度:

$$\lg Z_0 = (\lg u_2 - A \lg u_1) / (1 - A)$$

式中, $Z_0$ 为地表平均粗糙度,cm;  $u_1$ 、 $u_2$ 分别表示高度为  $Z_1$ 、 $Z_2$ 处的风速,m/s;  $A = u_2 / u_1$ 。

**土壤粒度** 布设沙障后,地表风速得到有效降低,细小沙粒得以保留,加上植物根系及其枯落物的固沙作用,使表土理化性质得到有效改良,所以土壤粒度也是一个反应沙障固沙技术改土效益的指标<sup>[30]</sup>。

**表土含水率** 在沙丘的迎风坡、丘顶和背风坡布设采样点,在前期无降水的情况下,在每一点选择两个测量深度,由便携式土壤水分速测仪测得土壤含水量<sup>[31]</sup>。表土含水率越高,说明沙障改土效应越明显。

**植被覆盖度** 植被覆盖度也是衡量各类沙障固沙技术成效的另一指标,反映了各类沙障内的植被恢复情况<sup>[32]</sup>。计算方法为通过随机选取多个  $1 \text{ m}^2$ 的观测点,测得其投影面积,求出平均值,然后除以平均植被面积。

**成活率** 植物成活率是反应沙障固沙技术是否成功的指标之一。通过调查不同沙障固沙技术在不同坡度的沙丘上植物成活率及植物生长状况,从而反映沙障固沙技术的成效<sup>[33]</sup>。

**产投比** 指治理单位面积所需花费,代表各种沙障固沙技术的平均防护效率。

$$I = C/A$$

式中, $I$ 为产投比,万元/ $\text{hm}^2$ ;  $C$ 表示总花费,万元;  $A$ 表示总面积, $\text{hm}^2$ 。

**防风效能** 风速大小是影响沙地移动的主要因素,所以防风效能是衡量沙障固沙技术性能的指标之一<sup>[34]</sup>。防风效能的计算公式为:

$$E_h = (u_{h_0} - u_h) / u_{h_0} \times 100\%$$

式中, $E_h$ 为高度  $h$ 处的防风效能(%);  $u_{h_0}$ 为对应沙丘高度  $h_0$ 处的平均风速(m/s);  $u_h$ 为沙障内高度  $h$ 处的平均风速(m/s)。

**输沙率** 输沙率是观测沙地高度(0—20 cm)内单位时间通过单位宽度的总沙量。在沙障中部区域设置 10 孔阶梯式集沙仪进行同步观测输沙率。10 孔阶梯式集沙仪观测高度为 20 cm,每 2 cm 为一层,计算出输沙率<sup>[35]</sup>。

**技术与未来发展关联度** 未来该区域的经济、社会发展对每种沙障固沙技术的需求程度。需求程度越高,说明这种沙障固沙技术越好。根据技术与未来发展关联度通过 0—4 评分标准划分等级,具体评分为:0-该技术与未来发展无关联;1-该技术与未来发展关联较少;2-该技术与未来发展有一定的关联性;3-该技术与未来发展关联较多;4-该技术完全适合未来发展。

技术可替代性 技术是否可以被其他技术所替代。沙障固沙技术对环境保护的作用越差,其可替代性越高。根据技术可替代性通过 0—4 评分标准划分等级,具体评分为:0—该技术无发展前景,可替代性很大;1—该技术可替代性较大;2—该技术有一定可替代性;3—该技术可替代性较小;4—该技术有很大的发展前景,可替代性很小。

沙障固沙技术评价指标体系三级指标信息表征与数据获取方法如表 4 所示。

表 4 沙障固沙技术评价指标体系三级指标信息表征与数据获取方法

Table 4 Connotation and data acquisition method of third class indicators for sand barrier technology

三级指标 Sub-index	指标解释 Index explanation	数据获取方法 Data acquisition method
技术结构 $i_1$ Technical structure $i_1$	构成技术的要素的完整性	在 0—4 区间评分,分值越大技术结构越完备
技术体系 $i_2$ Technology system $i_2$	各种技术之间相互联系的整体性	在 0—4 区间评分,分值越大技术体系越完整
破损率 $i_3$ Breakage rate $i_3$	沙障毁坏的比例	原始数据线性归一化
专利含有量 $i_4$ Patent content $i_4$	专利含有量	原始数据线性归一化
专业技术人员需求度 $i_5$ Demand of professional and technical personnel $i_5$	专业技术人员需求度	在 0—4 区间评分,分值越大需要专业技术人员越多
生态目标的有效实现程度 $i_6$ Effective achievement of ecological objectives $i_6$	技术与地区生态、经济和社会,地形、气候,产业关联和经济发展耦合以及政策、法律配套的相宜性	在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
经济目标的有效实现程度 $i_7$ Effective achievement of economic objectives $i_7$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
社会目标的有效实现程度 $i_8$ Effective achievement of social goals $i_8$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
地形条件适宜性 $i_9$ Suitability of topographic conditions $i_9$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
气候条件适宜性 $i_{10}$ Suitability of climate conditions $i_{10}$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
技术与产业关联程度 $i_{11}$ Technology and industry linkage degree $i_{11}$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
技术经济发展耦合协调度 $i_{12}$ Coupling and coordination degree of technological and economic development $i_{12}$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
政策配套程度 $i_{13}$ Policy matching degree $i_{13}$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
法律配套程度 $i_{14}$ Legal matching degree $i_{14}$		在 0—4 区间评分,分值越大技术相宜性越高
设置成本 $i_{15}$ Setup cost $i_{15}$	布设所需费用及维护费用	原始数据线性归一化
地表粗糙度 $i_{16}$ Surface roughness $i_{16}$	沙障措施布设后所引起的风速、土壤理化性质、植被恢复等间接变化	原始数据线性归一化
土壤粒度 $i_{17}$ Soil granularit $i_{17}$		原始数据线性归一化
表土含水率 $i_{18}$ Surface soil moisture content $i_{18}$		原始数据线性归一化
植被覆盖度 $i_{19}$ Vegetation coverage $i_{19}$		原始数据线性归一化
成活率 $i_{20}$ Survival rate $i_{20}$		原始数据线性归一化
产投比 $i_{21}$ Production to investment ratio $i_{21}$	平均防护效率	原始数据线性归一化

续表

三级指标 Sub-index	指标解释 Index explanation	数据获取方法 Data acquisition method
防风效能 $i_{22}$ Windbreak efficiency $i_{22}$	沙障措施布设后所引起的风速及输沙量的变化	原始数据线性归一化
输沙率 $i_{23}$ Sediment transport rate $i_{23}$		原始数据线性归一化
技术与未来发展关联度 $i_{24}$ Relevance between technology and future development $i_{24}$	生态发展对该项技术的潜在需求度	在 0—4 区间评分,分值越大与未来关联度越大
技术可替代性 $i_{25}$ Technological substitutability $i_{25}$	技术可替代性	在 0—4 区间评分,分值越大可替代性越小

## 2.2 评价指标权重确定

沙障固沙技术评价中涉及的因素很多,各因素之间的主次关系也有所不同。本文采用层次分析法对沙障固沙技术影响指标构建评价体系<sup>[36]</sup>。层次分析法(analytic hierarchy process, AHP 法)是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法。其赋权步骤主要包括构造判断矩阵、层次单排序及一致性检验、层次总排序及一致性检验<sup>[37-38]</sup>。

通过向石漠化治理技术、荒漠化治理技术、水土保持技术和生态修复技术四个领域的相关专家发放 120 份调查问卷,并收回 112 份有效问卷,确定了一二级指标的权重<sup>[25]</sup>。三级指标的权重确定以技术效益中的生态效益和社会效益为例:我们认为某指标在文献中出现的频次越高,说明该指标为这一技术的研究热点,能反应该技术的实施效果,这一指标在评价体系中的权重越大,从而计算出各指标的权重(图 1)。

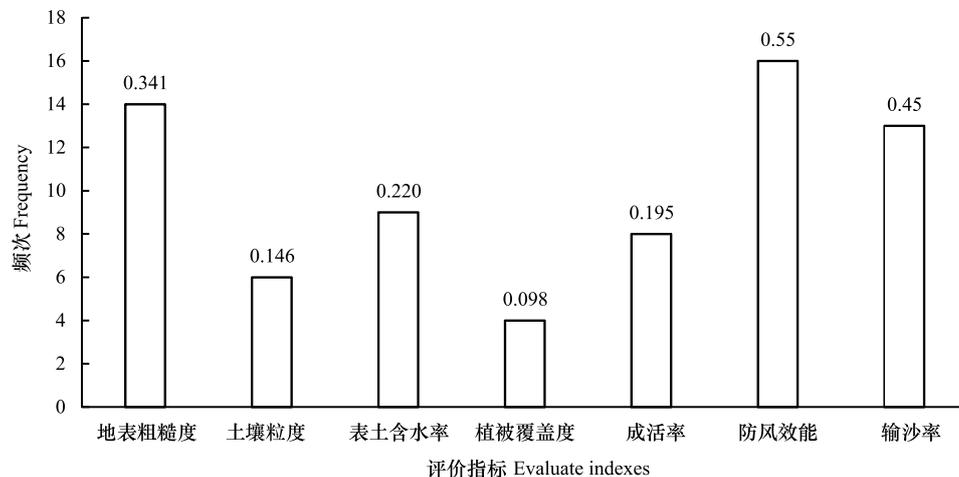


图 1 沙障固沙技术评价体系生态效益各指标权重

Fig.1 Each index weight of ecological benefit in sand barrier technology evaluation system

各级评价指标的权重如表 5 所示,其中技术相宜性为判断性指标,权重为 0.2983,其对应的 4 个二级指标中,立地适应性权重最大,说明立地条件对生态技术适用性的重要性,其他指标依次排序为目标适宜性,经济条件适宜性和政策法律适宜性,表示生态技术的成功应用与发展目标、经济条件和政策法律是密切相关的;4 个一级指标为准则性指标,权重分别为 0.2241, 0.1499, 0.2292, 0.0985。在进行沙障固沙技术评价时,首先判断该技术是否符合该地区的发展,只有满足该地区自然、经济、社会发展需求时,才能进入技术评选,然后利用准则性指标评价沙障固沙技术。在强调技术效益的同时,对每项技术进行全面的评价,权重分配合理。技术效益对应的二级指标中权重顺序为生态效益、经济效益和社会效益,以生态效益评价为主,符合我国建设生态文明的要求。生态效益共对应 5 个三级指标,筛选了能反应沙障固沙技术治沙成效的主要指标,其权重大小排序为地表粗糙度、表土含水率、成活率、土壤粒度和植被覆盖度(图 1)。三级指标中防风效能和输沙率对应

社会效益,沙障布设后,风速降低,输沙率减小,居民生活受影响越小,社会效益越大。其他二级指标均选取了最能代表该指标特征的三级指标,权重值通过一级和二级指标的权重加权计算而得。总体上该评价指标体系选取指标全面,权重分配合理,可应用在沙障固沙技术的效果评价及筛选工作中。

表 5 沙障固沙技术各级评价指标权重

Table 5 Weights of different level evaluation indexes for sand barrier technology

一级指标 Primary indexes	二级指标 Secondary indexes	三级指标 3-level indexes
技术成熟度 Technical maturity(0.2241)	技术完整性(0.3665)	技术结构(0.0411)
		技术体系(0.0410)
技术应用难度 Difficulty of technology application(0.1499)	技术稳定性(0.3944)	破损率(0.0884)
	技术先进性(0.2391)	专利含有量(0.0536)
	技能水平需求(0.4818)	专业技术人员需求度(0.0722)
技术相宜性 Technical suitability(0.2983)	技术应用成本(0.5182)	设置成本(0.0777)
	目标适宜性(0.2821)	生态目标的有效实现程度(0.0337)
		经济目标的有效实现程度(0.0252)
		社会目标的有效实现程度(0.0252)
	立地适宜性(0.3649)	地形条件适宜性(0.0545)
		气候条件适宜性(0.0544)
	经济发展适宜性(0.1847)	技术与产业关联程度(0.0276)
政策法律适宜性(0.1683)	技术经济发展耦合协调度(0.0275)	
技术效益 Technical efficiency(0.2292)	生态效益(0.4232)	政策配套程度(0.0251)
		法律配套程度(0.0251)
		地表粗糙度(0.0331)
		土壤粒度(0.0142)
		表土含水率(0.0213)
		植被覆盖度(0.0095)
		成活率(0.0189)
	经济效益(0.3591)	产投比(0.0823)
	社会效益(0.2177)	防风效能(0.0274)
		输沙率(0.0225)
技术推广潜力 Potential of technology promotion(0.0985)	生态建设需求度(0.6578)	技术与未来发展关联度(0.0648)
	技术可替代性(0.3422)	技术可替代性(0.0337)

### 3 讨论

目前在评价沙障固沙技术实施效果时采用的指标不够科学和全面,鉴于此,本文提出了适用于京津风沙源区沙障固沙技术评价指标,能够全面科学地反映沙障固沙技术的效果,但其中仍存在一些问题值得探讨。

不同沙障固沙技术在不同区域和不同时间下的效果具有不确定性,因此对其进行评价时应充分考虑自然条件,只有在地貌,气象等相近的情况下才能进行比较。京津风沙源区沙障固沙技术特性差异明显,应根据不同区域开展相应的沙障固沙技术评价研究。长时间尺度的试验不仅需要较高的时间成本,也需要较大经济投入。沙漠化治理是个动态的过程,沙障固沙技术也具有时间维度的动态性。因此为求评价科学性需限定在一定的时间内,例如选取我国重大治沙工程(通常以5年为期)所涉及的沙障固沙技术作为评价对象,以观测数据为评价依据,并以研究区布设沙障技术的实测效果来验证。选择重大生态工程检验评价模型主要有以下原因:(1)我国实施的重大生态工程都是以五年为期的,从时间尺度上可以避免不同时期的技术其成熟度,技术应用难度等指标的不同,最明显的就是不同时期沙障技术的实施成本差别很大;(2)我国已开展的生态工程大多是针对地域突出的生态环境问题进行的治理研究,所实施的技术也是以问题为导向,针对这些技术进行

评价避免了技术的地区差异性。

在确定沙障固沙技术评价指标权重时,应根据待评价技术的特征来确定评价指标的权重,如机械沙障通过降低风速,减少输沙量,而生物沙障主要依靠恢复植被达到固沙的目的,因此这两种沙障固沙技术评价指标的权重也应有所不同。为保证评价指标体系的实用性,技术结构、技术体系、技术相宜性等定性指标主要通过专家打分法获取评价数据。应当避免以综合评价得分评判各生态技术,而是根据不同地区生态问题的需要,通过比较各生态技术的判断性指标和准则性指标,甚至是某些关键三级指标的得分来选择生态技术。为了避免评价结果的无差异性,选取不同类别生态技术的技术效益评价指标应能反映这类生态技术的主要特征。在各评价技术的综合评价得分出现无差异性时,应检查各生态技术三级指标选取是否合理,从而保障评价结果的科学性。

#### 4 结论

本文针对京津风沙源区沙障固沙技术效果评价问题,建立了沙障固沙技术评价的方法体系,明确了沙障固沙技术评价指标集、评价指标权重以及沙障固沙技术评价面临的问题。在沙障固沙技术与自然条件、经济发展水平相协调的前提下,基于文献频次法和层次分析法从技术成熟度、技术应用难度、技术相宜性、技术效益、技术推广潜力 5 个方面共筛选出 1 项判断性指标、4 项准则性指标、14 项二级指标和 25 项三级指标指标,构建出沙障固沙技术评价指标体系。该指标体系以技术效益为主导,兼顾功能性和应用性综合评价,从而对京津风沙源区沙障固沙技术进行全面评价。

**致谢:**受到深圳市铁汉生态环境股份有限公司资助(THRD016)和中国科学院水土保持与生态环境研究中心王继军研究员的帮助,在此表示感谢。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 王涛. 走向世界的中国沙漠化防治的研究与实践. 中国沙漠, 2001, 21(1): 1-3.
- [ 2 ] 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所组. 寒区旱区环境与工程科学 50 年. 北京: 科学出版社, 2009: 191-261.
- [ 3 ] 韩致文, 王涛, 董治宝, 张伟民, 王雪芹. 风沙危害防治的主要工程措施及其机理. 地球科学进展, 2004, 23(1): 13-21.
- [ 4 ] 刘连友, 刘玉璋, 李小雁, 王建华, 彭海梅. 砾石覆盖对土壤吹蚀的抑制效应. 中国沙漠, 1999, 19(1): 60-62.
- [ 5 ] 马全林, 王继和, 詹科杰, 刘虎俊. 塑料方格沙障的固沙原理及其推广应用前景. 水土保持学报, 2005, 19(1): 36-39, 58-58.
- [ 6 ] 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 方海燕. 不同结构的尼龙网和塑料网防沙效应研究. 中国沙漠, 2005, 25(4): 483-487.
- [ 7 ] 郭力宏, 曹志伟, 张玉柱, 张庭文, 朱玉博, 王红梅, 卜金祥. 嫩江沙地黄柳小红柳高立式活体沙障调查与分析. 防护林科技, 2008, (4): 15-16.
- [ 8 ] 李生宇, 雷加强. 草方格沙障的生态恢复作用——以古尔班通古特沙漠油田公路扰动带为例. 干旱区研究, 2003, 20(1): 7-10.
- [ 9 ] 徐峻龄, 裴章勤, 王仁化. 半隐蔽式麦草方格沙障防护带宽度的探讨. 中国沙漠, 1982, 2(3): 16-23.
- [ 10 ] 修竹奇, 刘明义, 刘艳军, 张利, 郑秀文, 于德和. 植物网格沙障防风固沙试验研究. 中国水土保持, 1995, (8): 33-34.
- [ 11 ] 马青江, 耿生莲. 流沙沙障防护效益研究. 青海农林科技, 2002, (2): 10-11.
- [ 12 ] 马瑞, 王继和, 屈建军, 刘虎俊, 孙涛, 魏林源. 不同结构类型棉秆沙障防风固沙效应研究. 水土保持学报, 2010, 24(2): 48-51.
- [ 13 ] 马述宏, 李积山. 不同沙障的作用及对周围治沙的影响——以民勤县青土湖重点风沙口为例. 安徽农业科学, 2011, 39(17): 10415-10416, 10541-10541.
- [ 14 ] 孙涛, 刘虎俊, 朱国庆, 张莹花, 马瑞, 满多清. 3 种机械沙障防风固沙功能的时效性. 水土保持学报, 2012, 26(4): 12-16, 22-22.
- [ 15 ] 赵国平, 胡春元, 张勇, 严喜斌, 徐连秀. 高立式沙柳沙障防风阻沙效益的研究. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2006, 27(1): 59-63.
- [ 16 ] Zhao W Z, Hu G L, Zhang Z H, He Z B. Shielding effect of oasis-protection systems composed of various forms of wind break on sand fixation in an arid region: a case study in the Hexi Corridor, northwest China. Ecological Engineering, 2008, 33(2): 119-125.
- [ 17 ] Li X R, Xiao H L, He M Z, Zhang J G. Sand barriers of straw checkerboards for habitat restoration in extremely arid desert regions. Ecological Engineering, 2006, 28(2): 149-157.
- [ 18 ] Yan C G, Wan Q, Xu Y, Xie Y L, Yin P J. Experimental study of barrier effect on moisture movement and mechanical behaviors of loess soil.

Engineering Geology, 2018, 240: 1-9.

- [19] 王训明, 陈广庭. 塔里木沙漠石油公路半隐蔽式沙障区与流沙区沙物质粒度变化. 中国沙漠, 1996, 16(2): 180-184.
- [20] Jia R L, Li X R, Liu L C, Pan Y X, Gao Y H, Wei Y P. Effects of sand burial on dew deposition on moss soil crust in a revegetated area of the Tennger Desert, Northern China. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2341-2349.
- [21] Qu J J, Zu R P, Zhang K C, Fang H Y. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers. Geomorphology, 2007, 88(1/2): 193-200.
- [22] 王文彪, 党晓宏, 张吉树, 肖芳. 库布齐沙漠北缘几种机械沙障对沙丘土壤水分的影响. 北方园艺, 2011, (24): 182-185.
- [23] 党晓宏, 虞毅, 高永, 袁立敏, 马迎宾, 高君亮, 王珊, 张惜伟. PLA 沙障对沙丘土壤粒径的影响分析. 水土保持研究, 2014, 21(3): 16-19, 24-24.
- [24] 赵纳祺, 李锦荣, 温文杰, 汪季, 郭建英, 陈晓娜, 张格. 乌兰布和沙漠黄河段不同治理措施固沙效果研究. 内蒙古林业科技, 2018, 44(1): 7-12, 28-28.
- [25] 胡小宁, 谢晓振, 郭满才, 王继军. 生态技术评价方法与模型研究——理论模型设计. 自然资源学报, 2018, 33(7): 1152-1164.
- [26] 李茂森, 王继军, 陈超, 成思敏, 李玥. 基于 GIS 的安塞县县南沟流域农用地生态适宜性评价. 水土保持研究, 2018, 25(1): 237-242.
- [27] 甄霖, 王继军, 姜志德, 刘孝盈, 张长印, 马建霞, 肖玉, 谢永生, 谢高地. 生态技术评价方法及全球生态治理技术研究. 生态学报, 2016, 36(22): 7152-7157.
- [28] 朴起亨. 几种不同材料机械沙障防风效应研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- [29] 党晓宏, 高永, 虞毅, 李谦, 王珊, 吴昊, 王红霞, 赵鹏宇. 新型生物可降解 PLA 沙障与传统草方格沙障防风效益. 北京林业大学学报, 2015, 37(3): 118-125.
- [30] 丁爱强, 谢怀慈, 徐先英, 刘江, 张荣娟, 赵鹏, 付贵全. 3 种不同机械沙障设置后期对沙丘植被和土壤粒度与水分的影响. 中国水土保持, 2018, (5): 59-63.
- [31] 张圆, 李芳, 屈建军, 闫沛迎. 机械沙障组合对土壤含水量及温度的影响. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1533-1538.
- [32] 张雷, 洪光宇, 李卓凡, 高孝威, 黄萨仁, 王卓, 刘尚华, 王晓江. 基于层次分析法的毛乌素沙地 3 种造林模式恢复成效评价. 林业资源管理, 2017, (6): 108-112, 119-119.
- [33] 肖芳, 王钟涛, 高永, 董杰, 王淮亮, 党晓宏, 徐丽, 吕新丰. 新型低压水冲植柳技术下沙障铺设方式对沙柳造林效果的影响. 水土保持研究, 2013, 20(5): 82-85.
- [34] 孙浩, 刘晋浩, 黄青青, 赵可. 多边形草沙障防风效果研究. 北京林业大学学报, 2017, 39(10): 90-94.
- [35] 贾丽娜, 丁国栋, 吴斌, 张宇清, 郭跃, 韦立伟, 梁文俊. 几种不同材料类型带状沙障防风阻沙效益对比研究. 水土保持学报, 2010, 24(1): 41-44.
- [36] 符学葳. 基于层次分析法的模糊综合评价研究和应用[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [37] 王书吉, 费良军, 雷雁斌, 田伟. 两种综合赋权法应用于灌区节水改造效益评价的比较研究. 水土保持通报, 2009, 29(4): 138-142.
- [38] 曹庆奎, 刘开展, 张博文. 用熵计算客观型指标权重的方法. 河北建筑科技学院学报, 2000, 17(3): 40-42.