

# Study on Slope Protection Effects of Sowing Combined of Four Native Grasses in Semi-Arid Area Based on AHP Method

Ran Yu<sup>1</sup>, Jianguang Wang<sup>1\*</sup>, Qin Li<sup>1</sup>, Duo Li<sup>2</sup>, Jing Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Grassland, Resources and Environment, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot Inner Mongolia

<sup>2</sup>Beijing Lvjinghua Garden Engineering Co., Ltd., Beijing  
Email: yurankid@vip.qq.com, \*wangjg8580@163.com

Received: Nov. 20<sup>th</sup>, 2016; accepted: Dec. 17<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 20<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

For seeking the best mixed-sowing mode of four native plants in the semi-arid area of the Hasuhai road slope, Analytic Hierarchy Process (AHP) was conducted by Yaahp software to establish mathematical analysis model and evaluation system. Based on the functions and effects of slope protection, 16 testing parameters were determined and analyzed for 15 cropping patterns of two-year old (2013-2014) slope protection vegetation. The results show that the mixed-sowing mode (1:1:1:1) of Smooth brome (*Bromus inermis* Leyss), Crested wheatgrass (*Agropyrom cristatum* (L.) Gaertn), Dahuria wild ryegrass (*Elymus dahuricus* Turcz.) and Siberian wild rye grass (*Elymus sibiricus* L.) was obtained the highest score among the 15 cropping patterns (11 mixed-sowing modes and 4 single-sowing modes). The density, perennial velocity, integrated stress tolerance, overwintering rate, coverage, aboveground biomass, underground biomass and root volume were closely related to slope protection effects, and the scores of influencing factors with high comprehensive weights were also the highest or higher. It has proved that the mixed-sowing was the best sowing pattern in slope protection vegetation construction in this area.

## Keywords

Grass, Mixed Vegetation, Slope Protection Effect, The AHP Analytic Hierarchy Process, Semi-Arid Area

\*通讯作者。

# 基于AHP法研究半干旱地区4种乡土植物混播组合的护坡效果

于然<sup>1</sup>, 王建光<sup>1\*</sup>, 李琴<sup>1</sup>, 李夺<sup>2</sup>, 李静<sup>2</sup>

<sup>1</sup>内蒙古农业大学草原与资源环境学院, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>北京绿京华园林工程有限公司, 北京

Email: yurankid@vip.qq.com, wangjg8580@163.com

收稿日期: 2016年11月20日; 录用日期: 2016年12月17日; 发布日期: 2016年12月20日

## 摘要

为更有效准确筛选出4种乡土植物在半干旱地区哈素海环湖路边坡混播建植护坡植被的最佳组合混播模式, 本文利用Yaahp软件采用层次分析法(Alytic Hierarchy Process, 简称AHP), 通过建立数学分析模型和评价体系, 对15种混播组合处理建植的2年(2013-2014)护坡植被, 依据护坡效果所测试的16项指标进行了系统综合定量分析。结果表明, 11个混播组合处理与4个单播对照总计15个处理中, 综合得分最高的组合是无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss)、冰草(*Agropyrom cristatum* (L.) Gaertn.)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz.)、老芒麦(*Elymus sibiricus* L.) 4种植物等比例混播的组合模式, 其密度、成坪速度、综合抗逆性、越冬率、盖度、地上生物量、地下生物量、根体积这些与护坡效果密切、综合权重较高的影响因素相应的分值也是各处理中最高或者较高的, 由此证实该混播模式为该地区护坡植被建植中的最佳混播组合模式。

## 关键词

禾本科植物, 混播植被, 护坡效果, AHP层次分析法, 半干旱地区

## 1. 引言

随着越来越多高速公路、城市快速路等道路的建设, 不可避免对环境的破坏, 形成大量裸露的边坡, 这类边坡是公路建设当中土壤侵蚀的主要来源。为了保护公路边坡以及恢复并提高公路周边的生态环境, 植被重建是关键的一步。在生态恢复实践中, 用什么样的工程技术, 什么样的植物组合, 都决定了生态恢复与重建计划能否成功, 并且会影响已经退化生态系统恢复的方向和速度[1] [2]。可以用作护坡建植的植物有很多, 草本植物是其中应用较为广泛的一种。草种混播种植又是一种较优于单播种植的播种方式, 近年来国内外也多有应用[3]-[8]。本文将主要研究 4 种当地乡土植物不同混播组合对公路边坡的护坡效果。

层次分析法(Alytic Hierarchy Process, 简称 AHP)是上世纪 70 年代中期, 由美国运筹学家托马斯·萨提所提出的一种将决策者的定量计算和定性判断有效结合起来的决策分析方法[9]。目前 AHP 法主要应用在安全科学和环境科学领域。在安全生产科学技术方面主要应用包括油库安全评价、危险化学品评价、煤矿安全研究、交通安全评价以及城市灾害应急能力研究等[10]。在环境保护研究中的应用主要包括环境保护措施研究、生态环境质量评价指标体系研究、水质指标和水安全评价以及水生野生动物保护区污染

源确定等[11]。鉴于本研究组合模式多达 15 种, 测试指标多达 16 个, 有些指标还是定性指标, 指标间对于护坡效果的贡献率不一致, 如何归集定量分析这些性状不同、权重不一、数据(240 个)纷杂的试验结果, 从中筛选出最优组合模式, 常用的数理统计分析方法已不能胜任。选用 AHP 法, 对生态植被恢复效果进行评价不失为一种可靠的尝试。结果表明, 通过建立数学分析模型和创建合理的评价体系, 进行系统综合定量分析, 可以取得预期成果, 从中找出了我国北方半干旱地区护坡植被较优混播草种组合模式。

## 2. 材料和方法

### 2.1. 供试材料

试验所用材料均为当地常见的乡土植物种, 共有 4 种, 无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss, 简称 Bi)、冰草(*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn., 简称 Ac)、披碱草(*Elymus dahuricus* Turcz., 简称 Ed)和老芒麦(*Elymus sibiricus* L., 简称 Es), 由北京正道生态科技有限公司提供。其中无芒雀麦和冰草产地为加拿大, 披碱草和老芒麦产地为我国青海, 种子质量经测定均能满足试验要求。

### 2.2. 试验方法

#### 2.2.1. 试验地概况

试验地点位于内蒙古自治区呼和浩特市土默特左旗的哈素海风景区内环湖路 20 km 边坡处, 北纬 40°36'、东经 110°58'、海拔 988.2 m, 属于温带大陆性季风气候。年均气温 7.1℃, 年均降水量 339.8 mm, 全年光照充足, 太阳总辐射量在 1658.82~1727.77 Mw·h/m<sup>2</sup> 之间, 全年平均日照时数 3056.3~3115.5 h。由于筑路缘故, 试验地土壤基本上为砾石和碎石块且伴杂有筑路残留垃圾, 试验前进行了障碍物清理及种植土补换工作。边坡坡面朝向向北, 坡度为 20°。

#### 2.2.2. 试验方案

试验设 4 个单播对照处理、6 个双草种组合等比例混播处理、4 个三草种组合等比例混播处理和 1 个四草种组合等比例混播处理, 共 15 个处理(见表 1)。

小区面积 24 m<sup>2</sup> (6 m × 4 m), 重复 3 次, 计 45 个小区, 采用随机区组排列。2013 年 7 月 13 日播种, 方式为人工撒播, 播后用齿耙覆土(厚度约为 1 cm)并踩压, 苗后仅进行了杂草拔除, 此后为自然生长状态。

### 2.3. 测试指标

#### 2.3.1. 生态适应性指标

1) 成坪速度: 播种当年苗后盖度达到 85% 时视为成坪, 从出苗日起到成坪的时间来表示成坪速度。在每个试验小区内随机取 3 个重复 1 m × 1 m 的样方进行测量。

2) 越冬率: 2014 年春返青后, 在每个试验小区内随机取 3 个重复 20 cm × 20 cm 的样方, 测量其成活枝条数占总枝条数的百分比。

3) 综合抗逆性: 采用盆栽试验, 成坪后断水, 任其自然生长, 观察各处理植物干旱状态下的持久抗逆耐力, 在持续 40 天亏水期内能够保持良好生长状态时间越长的处理得分越高。采用 10 分制, 由 5 名专业技术人员分别根据各处理的生长情况估测打分, 最后取各处理重复平均数记为各处理最后得分。

4) 株高: 2014 年开花期, 在每个试验小区内随机取样株 10 株, 测量植株的绝对高度。

5) 密度: 2014 年开花期, 在每个试验小区内随机取 3 个重复 20 cm × 20 cm 的样方, 测量其枝条数。

6) 盖度: 2014 年开花期, 在每个试验小区内随机取 3 个重复 1 m × 1 m 的样方, 测量其覆盖度。

**Table 1.** Experimental design  
**表 1.** 试验设计方案

序号 No.	处理代码 Handling code	播种量(kg/hm <sup>2</sup> ) Seeding rate				合计 Total
		无芒雀麦 Smooth brome	冰草 Crested wheatgrass	披碱草 Dahuriawildryegrass	老芒麦 Siberian wildryegrass	
1	Bi	322.0	—	—	—	322.0
2	Ac	—	100.6	—	—	100.6
3	Ed	—	—	388.9	—	388.9
4	Es	—	—	—	382.1	382.1
5	BiAc	161.0	50.3	—	—	211.3
6	BiEd	161.0	—	194.5	—	355.5
7	BiEs	161.0	—	—	191.0	352.0
8	AcEd	—	50.3	194.5	—	244.8
9	AcEs	—	50.3	—	191.0	241.3
10	EdEs	—	—	194.5	191.0	385.5
11	BiAcEd	107.3	33.5	129.6	—	270.4
12	BiEdEs	107.3	—	129.6	127.4	364.3
13	BiAcEs	107.3	33.5	—	127.4	268.2
14	AcEdEs	—	33.5	129.6	127.4	290.5
15	BiAcEdEs	80.5	25.2	97.2	95.5	298.4

### 2.3.2. 固土能力指标

1) 根体积: 2014年8月, 在每个试验小区内随机取3个重复20 cm × 20 cm的样方, 下挖15 cm挖出植株根部, 清理敷土后用带刻度的量筒, 采用浸水法测量根体积。

2) 根系分布情况: 2014年8月, 在每个试验小区内随机取3个重复20 cm × 20 cm的样方, 下挖15 cm分别测量0~5 cm、5~10 cm、10~15 cm根的生物量, 依据层位根系生物量和根系生物量总重赋予分值, 层位越深根系生物量越重的分值越高, 根生物量总重越重的分值也越高。采用10分制, 由5名专业技术人员分别根据各处理层位根系生物量和根系生物量总重进行估测打分, 最后取各处理重复平均数记为各处理最后得分。

3) 地下生物量: 2014年8月, 在每个试验小区内随机取3个重复20 cm × 20 cm的样方, 深挖40 cm取出根部, 清理敷土后在65℃下烘干12 h至恒重, 测出地下生物风干重量。

### 2.3.3. 保水能力指标

1) 土壤绝干含水量: 2014年6月雨季前, 用土钻在每个试验小区内随机3次重复取土, 称鲜重后再在105℃下烘干12 h至干重即可计算出土壤绝干含水量。

2) 抗冲刷能力: 2014年9月雨季后, 在每个试验小区内随机取3个重复1 m × 1 m的样方, 通过测量冲刷沟的条数和面积并计算出总体积, 来反映各处理的抗冲刷能力, 冲刷沟数量、面积和总体积越大的得分越少, 反之越多。采用10分制, 由5名专业技术人员分别根据各处理小区冲刷沟数量、面积和总体积进行估测打分, 最后取各处理重复平均数计入各处理最后得分。

3) 地上生物量: 2014年8月, 在每个试验小区内随机取3个重复20 cm × 20 cm的样方, 取植株地上部分用烘箱在65℃下烘干12 h至恒重, 测出植株的地上生物风干重量。

4) 茎叶截留率: 2014年8月, 在每个试验小区内随机取3个重复20 cm × 20 cm的样方, 取植株地上部分茎叶, 称量茎叶鲜质量后将其样品完全浸入清水中5 min, 轻轻取出待重力水滴尽后再称量。通过吸水后质量与吸水前质量的差值对吸水前质量的百分比值计算出茎叶持水的最大截留率, 以此来反映护坡植被的茎叶持水截留能力。

#### 2.3.4. 景观指标

1) 色泽: 采用10分制, 由5名专业技术人员分别根据各处理试验小区草坪植被茎叶的绿色程度目测打分。

2) 绿色期: 目测每个处理试验小区内80%植株由早春返青日起至秋末茎叶枯黄日止的持续时间。

3) 均一性: 采用10分制, 由5名专业技术人员分别根据每个试验小区内草坪植被外貌的一致性程度目测打分。

### 2.4. 分析方法

#### 2.4.1. AHP 层次分析法的基本原理

AHP 层次分析法是一种用来解决多个目标复杂问题的定性与定量相结合的决策分析方法。该方法是将定量分析和定性分析相结合, 用决策者的经验来判断和衡量每个决策方案的相对重要程度, 并合理地给出每个决策方案的权重系数, 利用权重系数求得各个方案的优劣次序, 从而解决某些难以用定量法解决的课题。

#### 2.4.2. AHP 法评价不同草种混播组合模型的建立

##### 1) Yaahp 软件的应用

利用 AHP 层次分析法在计算各个因子的权重时, 有根法、和法、幂法等计算方法来计算权重向量。但是由于计算复杂和容易出错, 所以利用 Yaahp 软件计算, 以提高工作效率。

##### 2) 确定因素集和评价集

影响草种混播组合植被护坡效果的因素有很多, 从草种生态适应性方面来说有草种的密度、盖度、成坪速度、越冬率、株高和综合抗逆性; 从草种根系的固土能力来说有根系分布的情况、根体积和地下生物量; 从草种保水能力来说有土壤含水量、茎叶截留率、抗冲刷能力和地上生物量; 从景观方面来说有草种的绿色期、色泽和均一性。根据以上影响因素, 建立了以下因素集和评价集。

因素集:  $U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9, u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}, u_{14}, u_{15}, u_{16}\} = \{\text{密度, 盖度, 成坪速度, 越冬率, 株高, 综合抗逆性, 根系分布的情况, 根体积, 地下生物量, 土壤含水量, 茎叶截留率, 抗冲刷能力, 地上生物量, 绿色期, 色泽, 均一性}\}$ 。

评价集:  $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{优, 良, 中, 差}\}$

##### 3) 各因素权重的确定

① 构建层次结构图: AHP 层次分析法将决策问题分成若干个层次, 最高层为目标层, 表示研究问题的目的; 中间层为准则层, 表示解决问题的中间环节; 最底层为指标层, 表示选择的方案和措施等。本研究方案将“最佳草种混播组合”作为目标层; 将生态适应性、固土能力、保水能力和景观效果4项作为准则层; 将密度、盖度、成坪速度等16个具体因素作为指标层, 建立了如图1所示的层次结构分析图。

② 构建判断矩阵: 在层次分析中, 对每一层各个因素的相对重要性给出判断, 这些判断通过恰当的标度用数字表示出来写作矩阵, 这种矩阵就是判断矩阵。比例标度的意义见表2。

根据图1的层次结构图和表2的比例标度意义, 分别请10名相关试验专业人员对每两项指标的相关重要程度做出标度值判断, 经过统计与分析建立了正互矩阵及其权重系数(见表3)。

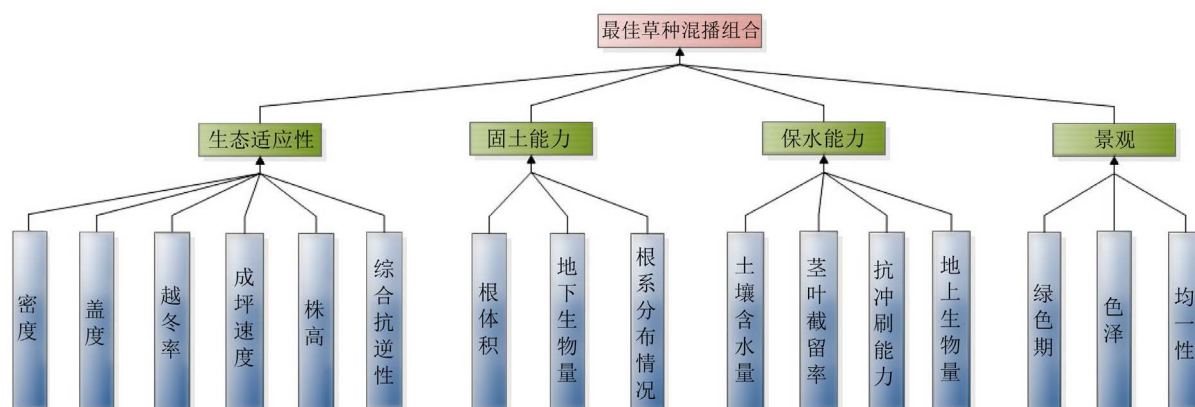


Figure 1. Best grasses mixed portfolio hierarchy chart

图 1. 最佳草种混播组合层次结构分析图

Table 2. Meaning the ratio of the scale

表 2. 比例标度的意义

标度值 Scaling value	两个因素相比，其中一个比另一个的重要程度 Compared to two factors, One of the important degree than the other
1	同样重要 Equally important
3	稍微重要 Somewhat important
5	比较重要 More important
7	十分重要 Very important
9	绝对重要 Absolutely essential

2、4、6、8 为上述相邻判断的中值  
2,4,6,8 for determination of the value of said adjacent

③ 权重的计算和一致性检验: 根据 Yaahp 软件可计算出表 3 各因素集判断矩阵中各因子的权重和矩阵的一致性, 凡判断矩阵的一致性小于 0.1 的因素集, 说明其矩阵具有满意的一致性, 证明其判断矩阵可行。计算结果表明, 最佳草种组合集、生态适应性集、固土能力集、保水能力集和景观效果集的判断矩阵一致性分别为 0.0277、0.0600、0.0000、0.0163 和 0.0000, 均小于 0.1, 说明各因素集矩阵具有满意的一致性, 证明各因素集判断矩阵均可行。

④ 综合评价分值的计算: 根据上文得到如下综合评价的公式

$$P = \sum_{i=1}^n Q_i R_i$$

式中,  $P$ ——不同草种混播组合的综合评价得分

$Q_i$ ——各项评价指标的权重

$R_i$ ——各项评价指标的分值

$i = 1, 2, 3, \dots, n$

根据  $P$  值的大小来确定最佳的草种混播组合。



**Table 3.** Judgment matrix various factors associated scale value and weighting factor  
**表 3.** 各因素正互矩阵关联标度值及其权重系数

序号 No.	因素集 Factor set	纵向因素 Longitudinal factor	横向因素 Transverse factors				权重系数 Weight coefficient			
			适应性	固土能力	保水能力	景观效果	因素集权重 Factor set Weight	综合权重 Comprehensive weight		
1	最佳 草种 组合	生态适应性	1	3	3	7	0.5238	0.5238		
2		固土能力	1/3	1	1	5	0.2117	0.2117		
3		保水能力	1/3	1	1	5	0.2117	0.2117		
4		景观效果	1/7	1/5	1/5	1	0.0528	0.0528		
5	生态 适应性	成坪速度	1	1	1/3	5	1/3	1/3	0.1179	0.0617
6		越冬率	1	1	1/3	3	1	1	0.1345	0.0705
7		综合抗逆性	3	3	1	5	3	3	0.3703	0.1940
8		株高	1/5	1/3	1/5	1	1/3	1/3	0.0487	0.0255
9		密度	3	1	1/3	3	1	1	0.1643	0.0861
10		盖度	3	1	1/3	3	1	1	0.1643	0.0861
11	固土 能力	根体积	1	3	1				0.4286	0.0907
12		根系分布	1/3	1	1/3				0.1428	0.0302
13		地下生物量	1	3	1				0.4286	0.0907
14	保水 能力	土壤含水量	1	3	1/3	3			0.2517	0.0533
15		抗冲刷能力	1/3	1	1/5	1			0.0967	0.0205
16		地上生物量	3	5	1	5			0.5549	0.1175
17		茎叶截留率	1/3	1	1/5	1			0.0967	0.0205
18	景观 效果	色泽	1	1/3	1				0.2000	0.0106
19		绿色期	3	1	3				0.6000	0.0317
20		均一性	1	1/3	1				0.2000	0.0106

### 3. 结果与分析

#### 3.1. 测试结果

各处理所有因素指标测试结果见表 4。

根据显著性检验结果可以看出，在生态适应性因素集中，成坪速度和株高这两个测试项目比较占优的是披碱草和老芒麦以及含有这两种草的混播组合。综合抗逆性项目则是无芒雀麦和冰草以及含有这两种草的混播组合较优势。越冬率、密度和盖度的测试项目，混播组合要比单播占优；固土能力因素集

Table 4. Each handle all projects test results table  
表 4. 各处理所有项目测试结果表

测试指标 Testing Index	草种组合处理 Grass combination treatment														
	Bi	Ac	Ed	Es	BiAc	BiEd	BiEs	AcEd	AcEs	EdEs	BiAcEd	BiEdEs	BiAcEs	AcEdEs	BiAcEdEs
成坪速度(d)	59BCDE	70A	51DEFG	50DEFG	64ABCD	55DEFG	67AB	65ABC	48FG	52EFG	49EFG	56CDEF	45G	47FG	
越冬率(%)	64F	63F	71DEF	76CD	80BC	73CDE	75CDE	75CDE	67EF	88AB	85AB	87AB	93A	90A	
综合抗逆性	8.6A	8.6A	5.7DE	5.3E	8.0A	6.0CDE	7.8AB	8.2A	8.4A	8.5A	6.9ABCDE	7.1ABCD	6.2BCDE	8.4A	
株高(cm)	37DEF	22I	45ABCD	51A	39CDE	30FGH	49AB	29GHI	35EFG	46ABC	43ABCDE	41BCDE	48AB	46ABC	
密度(株/dm <sup>2</sup> )	16EF	8F	22DEF	35BCD	36BCD	29CDE	36BCD	36BCD	45BC	51B	47BC	38BCD	40BCD	78A	
盖度(%)	76CDE	63F	70EF	74DE	91AB	82BCD	85ABC	89AB	95A	94A	88AB	91AB	87AB	93AB	
根体积(cm <sup>3</sup> )	68A	60AB	50BCD	22G	40CDEF	44BCDE	56ABC	24FG	52ABCD	40CDEF	36DEFG	30EFG	22G	54ABC	
根系分布情况	7.7BC	7.2C	8.0ABC	8.3ABC	8.5AB	8.7AB	7.9ABC	8.4AB	8.5AB	8.9AB	9.1A	8.8AB	8.2ABC	8.5AB	
地下生物量 (t/hm <sup>2</sup> )	146.3A	124.7B	87.1CD	34.5I	46.9GH	65.2E	77.6D	41.1HI	130.8B	55.4EFG	80.4D	58.2EF	52.0FG	93.5C	
土壤含水量(%)	16.7CDEF	24.1ABC	29.3A	12.2EFGH	8.6GH	6.0H	10.7FGH	19.3CDE	21.1BCD	18.6CDE	6.7GH	8.2GH	28.0AB	14.5DEFG	
抗冲刷能力	6.3DE	6.4DE	6.0E	6.3DE	6.4DE	7.2ABC	6.0E	7.5AB	7.3ABC	6.6CDE	6.7CDE	7.7A	6.8BCD	7.2ABC	
地上生物量 (t/hm <sup>2</sup> )	15.7A	8.6BCD	8.8BCD	7.1BCD	8.0BCD	8.7BCD	9.2B	8.9BCD	8.2BCD	6.9BCD	9.0BC	6.7CD	6.6D	13.8A	
茎叶截留率(%)	28.7ABC	25.4C	26.2BC	28.3ABC	29.5ABC	32.6A	29.5ABC	27.5ABC	30.6ABC	30.0ABC	27.8ABC	28.1ABC	31.7AB	29.2ABC	
色泽	8.0ABC	8.6A	8.3AB	8.5A	7.2CDE	7.6BCD	7.3CDE	6.9DEF	6.2F	6.7EF	7.0DEF	7.3CDE	6.2F	6.9DEF	
绿色期(d)	223EFG	233BCD	226DEFG	224EFG	219G	226DEFG	242A	229DEFG	235ABC	228CDEF	222FG	236ABC	240AB	234ABCD	
均一性	8.5AB	9.1A	8.2BC	8.6AB	8.0BC	7.6CD	7.9BC	6.9DE	7.7C	7.6CD	6.3E	6.5E	6.2E	6.4E	

注:表中各处理数据为平均数,数字后字母为横向各处理显著性检验结果,大写字母为0.01水平下的显著性检验结果。Note: Each processing data in the table as mean, after the number of letters was each treatment transverse significant test results, uppercase letters are significant test results under the 0.01 level.



中，根体积和地下生物量的测试项目，无芒雀麦和冰草以及含有这两种草的混播组合较有优势。根系分布情况的测试项目差距不显著；保水能力的因素集中，土壤含水量的测试项目，冰草和披碱草以及含有冰草的混播组合占优。抗冲刷能力的测试项目，混播组合比单播草种占优。地上生物量测试项目中无芒雀麦比其他组合占优。茎叶截留率的测试项目各组差异性不大；景观效果的因素集中，色泽和均一性测试项目，单播草种比混播草种占优，其中冰草优于其他草种。绿色期测试项目，混播组合略优于单播。

综上所述，披碱草和老芒麦两种速生草种成坪速度较快，混播组合相对于单播处理的越冬率要高，无芒雀麦和冰草两种草种的综合抗逆性要优于其他种植物，密度与盖度指标混播组合优于单播。而色泽和均一性指标单播要优于混播，其中冰草最优。故需要快速成坪时，应选择披碱草与老芒麦。立地条件较差又需要长久的水土保持性能时，应选用含有无芒雀麦与冰草的混播组合。对景观效果要求较高时，应选用单播种植，其中冰草效果最佳。

### 3.2. AHP 分析结果

通过表 4 各处理的测试结果，根据每项测试指标的实际情况表示为 10 分制的形式，并利用 Yaahp 软件计算每个处理的综合得分，详见表 5。

通过 Yaahp 软件的计算，综合得分最高的为 BiAcEdEs 处理，其次为 EdEs 和 Bi 处理，之后依次排序为 BiAcEd > AcEs = Ac = BiEdEs > Ed = AcEdEs = BiAc > BiEs = AcEd = BiAcEs > BiEd，最低的是 Es 处理。即最优的护坡草种混播组合是无芒雀麦、冰草、披碱草、老芒麦四种草种等比例混播的处理，最差的是老芒麦单播的处理。

Table 5. Each set of processing each score and composite score table

表 5. 各处理每项得分与综合得分表

评价指标 Evaluation	草种组合处理 Grass combination treatment															
	Bi	Ac	Ed	Es	BiAc	BiEd	BiEs	AcEd	AcEs	EdEs	BiAcEd	BiEdEs	BiAcEs	AcEdEs	BiAcEdEs	
成坪速度	7.1	5.0	8.4	8.7	6.2	7.5	7.5	6.9	6.7	9.2	8.6	9.0	8.1	9.5	9.4	
越冬率	7.4	7.3	7.1	7.6	8.0	7.3	8.1	7.5	7.5	6.7	8.8	8.5	8.7	9.3	9.0	
综合抗逆性	8.6	8.6	5.7	5.3	8.0	6.0	7.5	7.8	8.2	8.4	8.5	6.9	7.1	6.2	8.4	
株高	8.5	6.7	8.9	9.4	8.6	8.1	7.5	9.3	8.0	8.4	9.0	8.8	8.7	9.2	9.0	
密度	6.5	5.6	6.7	8.0	8.1	7.3	7.0	8.1	8.1	8.9	9.2	9.0	8.3	8.6	9.1	
盖度	7.6	6.3	7.0	7.4	9.1	8.2	8.5	8.5	8.9	9.5	9.4	8.8	9.1	8.7	9.3	
根体积	9.1	8.9	6.6	4.9	6.3	6.5	6.4	5.2	5.6	6.3	6.0	5.8	5.4	4.9	8.3	
根系分布情况	7.7	7.2	8.0	8.3	8.5	8.7	7.9	8.4	8.5	8.5	8.9	9.1	8.8	8.2	8.5	
地下生物量	9.2	9.2	8.3	6.5	7.0	7.7	8.1	6.9	7.6	9.0	7.4	8.2	7.4	7.1	8.8	
土壤含水量	7.5	9.2	9.8	6.2	5.3	4.2	6.0	7.8	9.0	8.3	7.6	4.9	5.1	9.7	7.0	
抗冲刷能力	6.3	6.4	6.0	6.3	6.4	7.2	6.0	7.5	6.9	7.3	6.6	6.7	7.7	6.8	7.2	
地上生物量	8.2	6.4	9.5	6.0	6.2	6.6	6.4	6.3	6.0	6.4	5.9	6.3	5.8	5.8	7.3	
茎叶截留率	7.6	6.9	7.0	7.7	7.8	8.2	7.8	7.1	7.6	8.0	7.9	7.2	7.5	8.0	7.8	
色泽	8.0	8.6	8.3	8.5	7.2	7.6	7.3	7.3	6.9	6.2	6.7	7.0	7.3	6.2	6.9	
绿色期	7.5	7.9	7.6	7.5	7.3	7.6	8.2	7.7	8.0	7.8	7.6	7.5	8.1	8.2	7.9	
均一性	8.5	9.1	8.2	8.6	8.0	7.6	7.9	6.9	8.1	7.7	7.6	6.3	6.5	6.2	6.4	
综合得分	8.0	7.5	7.4	6.7	7.4	6.9	7.3	7.3	7.5	8.0	7.9	7.5	7.3	7.4	8.4	

结合表 3、表 4 与表 5 可以发现, 16 项测试项目的得分与综合得分呈正相关。综合抗逆性、密度、盖度、根体积、地上与地下生物量这几项综合权重较高的测试项目对综合得分的影响比较明显, 而其他综合权重较低的测试项目对综合得分的影响较小, 说明通过 AHP 法分析得出的结果存在必然性。对比表 4 与表 5, 在综合得分较高的 BiAcEdEs、EdEs、Bi、BiAcEd 四个处理中, 各测验项目也相对其他组合占有优势, 说明 AHP 法是可靠的。

由于披碱草和老芒麦是速生草种, 所以在成坪速度、密度、盖度等指标中得分较高, 这些测试指标的综合权重也较高, 所以造成了披碱草与老芒麦混播组合的综合得分比较高。但是从组合应用的长远性来看, 披碱草与老芒麦的生长速度优势就相对减弱了。

## 4. 讨论

混播组合植物建植护坡植被是一种有效的生态工程方法, 长期以来对于护坡的生态效果却一直没有可靠可信的评价体系和评价方法。方胜[12]于 2011 年在分析了植被护坡机理、生态学理论、土壤学理论、景观美学理论和可持续发展理论的基础上, 结合以往相关评价原则和方法后, 综合考虑了根系的力学效应、枝叶的水文效应、植被的生态效应、植物的景观效应, 提出了 AHP 层次分析法。在构造出判断矩阵基础上确定相关测试指标的权重, 用综合评价指数法建立评价体系和评价模型, 从而有效地系统综合定量评价了植被护坡效果和工程质量。本文针对哈素海环湖路 4 个植物种组合的 15 种混播模式建植的护坡植被, 结合自身试验项目测试指标和预期目标, 先计算确定出权重分配, 然后建立评价指标体系和评价模型, 运用 Yaahp 软件、采用 AHP 层次分析法定量评价了各组合混播模式的护坡效果, 结果符合实际效果, 与方胜对贵阳乌当区行政中心边坡和沾昆铁路 DK535+850~955 左侧边坡的评价结果一致, 由此进一步验证了 AHP 层次分析法的合理性和科学性。

植被护坡效果的好坏取决于植物种类的选择及其组合模式, 因为每一种植物自身的生物学特性、建植难易度及其与其他种植物间的相容性很不一样。从本试验地自然条件看, 地处半干旱地区, 坡陡且土层薄而贫瘠, 养护条件也不具备, 为此立足本地选择 4 种乡土植物种, 各自在生物学特性上又有互补性, 通过各种组合混播模式筛选出最优模式。4 种植物的生物学特性表现为, 无芒雀麦喜水耐涝出苗较慢属于长寿命植物, 冰草极耐旱建植慢属于长寿命植物, 披碱草耐旱出苗快属于短寿命植物, 老芒麦较耐旱建植快属于短寿命植物。从定量综合评价得分数值上看, 最高的无芒雀麦、冰草、披碱草、老芒麦 4 个草种等比例混播组合模式得分 8.4, 披碱草与老芒麦等比例混播组合模式和无芒雀麦单播模式的得分均为 8.0, 无芒雀麦、冰草、披碱草 3 个草种等比例混播组合模式得分 7.9, 最低的组合模式无芒雀麦与披碱草等比例混播组合模式得分 6.9, 老芒麦单播模式得分 6.7。这种结果既符合设计目的, 又出乎意外。4 种植物的组合模式符合原设计的意图和愿望, 即披碱草和老芒麦能够促进快速建植, 无芒雀麦和冰草能够维持植被的长期稳定, 同时二者对于坡段各部位土壤水分条件的不稳定有互补效能, 当水分条件好时无芒雀麦能够良好生长, 当水分条件差时无芒雀麦生长不良但冰草能够正常生长; 披碱草与老芒麦等比例混播组合模式, 尽管得分较高, 是由于建植初期显示了二者的优越性缘故, 但因草地寿命有限, 不在考虑之中; 无芒雀麦单播模式, 因背离了植被群落多样性理论而不必考虑; 值得考虑的是无芒雀麦、冰草、披碱草 3 个草种等比例混播组合模式, 尽管分值与最高分组合模式有一定差距, 但从该模式组合植物种类看尚有考虑价值。出乎意外的是, 无芒雀麦与披碱草等比例混播组合模式和无芒雀麦与冰草等比例混播组合模式, 居然得分都很低, 分析其原因可能与植物种间竞争和相容性差有关。

## 5. 结论

在地处我国北方半干旱地区的哈素海环湖路边坡植被建植工程中, 经过 AHP 层次分析法系统综合定

量评价, 最优的混播模式为无芒雀麦、冰草、披碱草、老芒麦 4 个草种的等比例混播组合模式, 此外无芒雀麦、冰草、披碱草 3 个草种的等比例混播组合模式也值得考虑, 他们在密度、成坪速度、综合抗逆性、越冬率、盖度、地上生物量、地下生物量、根体积这些综合权重较高的影响因素上获得的分值也是各处理中最高或者较高的。

## 基金项目

内蒙古自然科学基金(2013MS0401)、国家自然科学基金(31460633)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 张明亮. 我国生态环境退化的问题分析及对策[J]. 国土与自然资源研究, 2003, 24(3): 32-34.
- [2] 彭少麟. 恢复生态学与退化生态系统的恢复[J]. 中国科学院院刊, 2000, 15(3): 188-192.
- [3] 席嘉宾. 高等级公路边坡牧草绿化混播试验的研究[J]. 甘肃农业大学学报, 1997, 32(3): 271-275.
- [4] 沈少君, 林文雄, 陈芳育, 梁义元. 草坪混播技术研究现状与展望[J]. 中国草地, 2002, 24(7): 47-52.
- [5] 马进, 林夏珍, 王小德, 郑钢, 孟瑾. 浙江绿地草坪草种混播组合筛选研究[J]. 中国草地, 2003, 25(3): 53-58.
- [6] 高玉平, 武小钢. 高速公路边坡绿化草种混播配方研究[J]. 山西林业科技, 2006, 35(1): 42-44.
- [7] 马海霞, 王柳英. 不同草种混播组合在高速公路边坡的建植效果研究[J]. 草原与草坪, 2007, 27(3): 33-37.
- [8] 王小华. 几种草坪草混播绿化组合对高速公路边坡防护效益的研究[J]. 科技情报开发与经济, 2009, 19(22): 132-134.
- [9] 叶义成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [10] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法在安全科学研究中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(2): 69-73.
- [11] 郭金玉, 张忠彬, 孙庆云. 层次分析法的研究与应用[J]. 中国安全科学学报, 2008, 18(5): 148-153.
- [12] 方胜, 张俊云. 植被护坡工程质量评价方法研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2011.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ojswc@hanspub.org](mailto:ojswc@hanspub.org)