

乌兰布和荒漠生态系统 12 种沙生灌木苗期的抗旱性

贾玉奎^{1,2}, 罗凤敏^{1,2}, 张景波^{1,2}, 高君亮^{1,2}, 辛智鸣^{1,2}, 刘芳^{1,2}

(1. 中国林业科学研究院 沙漠林业实验中心, 内蒙古 磴口 015200;

2. 国家林业局 内蒙古磴口荒漠生态系统定位研究站, 内蒙古 磴口 015200)

摘要: [目的] 建立沙生灌木抗旱性评价指标体系, 为沙区优良树种的筛选提供科学依据。[方法] 以乌兰布和荒漠生态系统 12 种沙生灌木的 2 年生幼苗为材料, 测定了 7 项水分生理指标, 采用主成分分析和聚类分析对灌木抗旱性进行了研究。[结果] (1) 麻黄(*Ephedra distachya* Linn.)、白刺(*Nitraia tangutorum* Bobr) 及柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.) 的水势低于其他 9 种灌木; 霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Maxim.) 的束缚水含量和束缚水与自由水(V_a/V_s) 比值较高, 分别为 64.20%, 3.3; 沙木蓼(*Atraphaxis bracteata* A. Los.)、白刺及柽柳(*Tamarix chinensis* Lour.) 的蒸腾速率显著低于其他 9 种灌木; 梭梭(*Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge) 与麻黄的恒重时间最长, 均为 144 h; 沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) Cheng F.) 的残留含水率最高(44.80%)。 (2) 水势、 V_a/V_s 值、残留含水率、束缚水、恒重时间、蒸腾速率 6 个指标对植物抗旱性的影响较大, 累积方差贡献率达 87.59%。 [结论] 依照抗旱性大小将 12 种植物分为三类, 强抗旱灌木为麻黄; 中抗旱灌木为梭梭、白刺、霸王; 弱抗旱灌木为花棒(*Hedysarum scoparium* Fisch)、杨柴(*Hedysarum mongolicum* Turcz.)、柽柳、柠条锦鸡儿、沙冬青、沙木蓼、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)。

关键词: 沙生灌木; 抗旱性; 主成分分析; 聚类分析; 乌兰布和荒漠; 生态系统

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)05-0095-05

中图分类号: S718.43

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.05.083

Drought Resistance of Twelve Desert Shrubs at Seedling Stage in Ulan Buh Desert Ecosystem

JIA Yukui^{1,2}, LUO Fengmin^{1,2}, ZHANG Jingbo^{1,2}, GAO Junliang^{1,2}, XIN Zhiming^{1,2}, LIU Fang^{1,2}

(1. Experimental Center of Desert Forestry, Chinese Academy of Forestry,

Dengkou, Inner Mongolia 015200, China; 2. Inner Mongolia Dengkou Desert Ecosystem

Research Station, State Forestry Administration, Dengkou, Inner Mongolia 015200, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to provide the foundation for selecting the excellent afforestation species in sandy area by establishing the drought resistance evaluation system. [Methods] Two-year-old seedlings of the twelve desert shrubs in Ulan Buh desert ecosystem were selected as the experimental materials. Through measuring seven water physiological indexes, the drought resistances of the twelve desert shrub species were studied by the principal component analysis and cluster analysis. [Results] (1) The water potential of *Ephedra distachya*, *Nitraia tangutorum* and *Caragana korshinskii* was lower than the other nine shrub species. The bound water content and the ratio value of bound water and free water (V_a/V_s) of *Zygophyllum xanthoxylon* was relatively higher, which was 64.20% and 3.3, respectively. The transpiration rate of *Atraphaxis bracteata*, *Nitraia tangutorum* and *Tamarix chinensis* was significantly lower than the other nine shrub species. The constant weight time of *Haloxyylon ammodendron* and *Ephedra distachya* was the longest, and it was 144 h. The residual moisture content of *Ammopiptanthus mongolicus* was the highest(44.80%). (2) The drought resistance of the twelve desert shrubs in Ulan Buh desert ecosystem was significantly influenced by water potential, V_a/V_s , residual moisture content, bound water, transpiration rate and constant weight time, and the cumulative variance contribution rate reached to

收稿日期: 2015-01-27

修回日期: 2015-03-09

资助项目: 国家林业公益性行业科研专项项目“生态经济型植物欧李的沙产业开发技术研究”(201504710)

第一作者: 贾玉奎(1962—), 男(汉族), 内蒙古自治区丰镇市人, 学士, 高级工程师, 主要从事沙区植物育种与栽培方面的研究。E-mail: slzxjia@126.com。

87.59%。[Conclusion] According to the drought resistance, twelve desert shrubs can be clustered into 3 categories. *Ephedra distachya* belongs to the strong drought-tolerant shrub; *Haloxyylon ammodendron*, *Nitraia tangutorum* and *Zygophyllum xanthoxylon* belong to the medium drought-tolerant shrub; *Hedysann scoparium*, *Hedysarum mongolicum*, *Tamarix elongate*, *Caragana korshinskii*, *Ammopiptanthus mongolicus*, *Atraphaxis bracteata*, *Calligonum mongolicum* and *Caragana microphylla* belongs to the weak drought-tolerant shrub.

Keywords: desert shrub; drought resistance; principal component analysis; cluster analysis; Ulan Buh desert ecosystem

水资源短缺是荒漠地区社会经济发展、生态建设、植被恢复与重建的主要限制因子。对荒漠地区植物的抗旱性进行评价,能够为选育抗旱植物提供优良种质资源。植物抗旱性是多种因素综合作用的结果^[1],不仅表现在外部形态上,也表现在内部结构、生理代谢方面。

沙生灌木是干旱、半干旱地区主要的牧畜饲草和造林树种,对维持荒漠生态系统安全起着重要作用^[2]。为了适应干旱的自然环境,植物抗旱性在形态结构和生理结构方面表现出与生境相适应的变化。例如,灌丛状生长、枝条具枝刺、根系较发达以及表现出低的水势等^[3-5]。由于不同植物种自身的生物学特性以及生长、生境不同,其对干旱逆境的适应能力也存在一定差异,这种差异对不同植物种的引种筛选以及造林等生产实践活动起着至关重要的意义。不同植物种的抗旱机制不同,单一的抗旱性指标很难反映出植物对干旱适应的综合能力^[6]。因此,为全面、准确地评价不同植物种的抗旱能力,采用与抗旱性有关的多项指标进行评价^[7-9]。研究表明,评价具有明显旱生结构植物的抗旱性可优先考虑其形态、结构以及生产力指标,也可以包括一些生理指标^[10],但是评价其他树种的抗旱性则要优先选用生理以及生产力指标^[11]。

不同灌木对干旱逆境的适应和反应能力不同。本研究对 12 种沙生灌木的水分生理指标进行研究,并通过聚类分析方法将其分类,以期对鉴定 12 种沙生灌木的抗旱性及因地制宜选择优良灌木品种提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于乌兰布和沙漠东北部的内蒙古自治区磴口县,中国林业科学研究院沙漠林业实验中心林场内,地理坐标为 40°09′—40°57′N, 106°9′—107°10′E。该区属于温带大陆性气候,气候干燥,光照充足,风沙频繁。年均气温 7.8℃,年均日照 3 100~3 300 h,年均相对湿度 47%,年均风速 3~3.7 m/s。地貌为固

定、半固定、流动沙丘与丘间低地相间分布,且以固定和半固定沙丘为主。土壤以风沙土为主。天然植被主要为旱生、超旱生类型的荒漠植被以及盐生植被。优势树种有油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch)、白刺(*Nitraia tangutorum* Bobr)和沙冬青(*Ammopiptanthus mongolicus* (Maxim. ex Kom.) Cheng F.)等。

2 材料与方法

2.1 供试材料

试验选取了 12 个灌木树种:花棒(*Hedysann scoparium* Fisch)、杨柴(*Hedysarum mongolicum* Turcz.)、柽柳(*Tamarix chinensis* Low.)、柠条锦鸡儿(*Caragana korshinskii* Kom.)、梭梭[*Haloxyylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge]、沙冬青、白刺、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Maxim.)、沙木蓼(*Atraphaxis bracteata* A. Los.)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum* Turcz.)、麻黄(*Ephedra distachya* Linn.)和小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla* Lam.)。试验在大田条件下进行,分别对以上灌木树种进行苗期试验。对于选定的每种植物,分别对每个植物种标记生长良好、健壮的个体作为取样植株。采集时尽量选择大小一致的植株阳面成熟叶片。考虑到气象因素对取样的影响,采样在 8 月上旬高温、强光期进行,保证气温、光照对于采样的相对稳定和一致性,采样时天气晴朗。

2.2 试验方法

叶片水势采用水势仪离体叶测定法,使用 WP4-T 露点水势仪测定;叶片水分饱和亏采用烘干称重法,取样后叶片迅速密封,带回实验室立即进行测定,叶片先称鲜重(W_f),浸入水中 12 h 后称饱和重(W_t),然后烘干称干重(W_d),自然饱和亏缺 = $(W_t - W_f) / (W_t - W_d) \times 100\%$;自由水与束缚水含水量采用郝再彬方法^[12];蒸腾速率用 LI-6400 型便携式植物光合作用仪测定;抗脱水力采用离体自然干燥法。用 Office Excel 2003 和 SAS 9.0 软件对试验数据进行整理。

3 结果与分析

3.1 不同植物种水势比较

水势反映一定土壤水分状态下灌木内部水分的恢复状况, 叶水势越高, 则吸水能力越低, 抗旱性越差^[13-14]。由图 1 可以看出, 12 种灌木叶片水势由小到大依次为麻黄(-31.0 MPa) < 白刺(-30.4 MPa) < 柠条锦鸡儿(-26.0 MPa) < 霸王(-23.0 MPa) < 花棒(-15.0 MPa) = 梭梭(-15.0 MPa) < 沙拐枣(-14.6 MPa) < 小叶锦鸡儿(-14.3 MPa) < 柽柳(-12.8 MPa) = 沙冬青(-12.8 MPa) < 杨柴(-10.9 MPa) < 沙木蓼(-10.6 MPa)。在相同的条件下, 麻黄、白刺以及柠条锦鸡儿的水势低于其他 9 种灌木, 以灌木叶片水势为依据, 说明麻黄、白刺以及柠条锦鸡儿的抗旱性较强。

3.2 不同植物种束缚水及束缚水/自由水比较

自由水(V_s)和束缚水(V_a)含量是植物组织代谢活性和抗性强弱的重要指标。植物细胞中束缚水比例大, 表明细胞原生质胶体亲水性越强, 有利于植物吸水并保持体内水分, 能够提高植物耐旱能力, 即抗旱性强的植物具有较高的束缚水含量和 V_a/V_s 比值^[15-16]。

表 1 12 种沙生灌木束缚水(V_a)及束缚水/自由水(V_s)比较

植物名称	花棒	杨柴	柽柳	柠条锦鸡儿	梭梭	沙冬青	白刺	霸王	沙木蓼	沙拐枣	麻黄	小叶锦鸡儿
$V_a/\%$	38.8	35.8	40.1	36.3	56.4	37.3	50.5	64.2	20.1	30.1	35.6	30.4
V_a/V_s	1.4	1.2	1.7	3.2	2.6	1.2	1.9	3.3	0.4	0.7	3.5	2.6

3.3 不同植物种水分饱和和亏比较

水分饱和亏 (WSD) 表示植物组织实际相对含水量距饱和相对含水量的差值大小, 是衡量植物耐旱能力的指标之一, 也是研究植物水分关系的一个重要指标。水分饱和和亏越大, 说明林木水分亏缺越严重。一般认为, 植物受到水分胁迫后, 抗旱性强的品种水分亏缺较小。由图 2 可以看出, 12 种灌木叶片水分饱和和亏由大到小依次为白刺(55.6%) > 柽柳(53.8%) > 沙冬青(46.2%) > 麻黄(40.1%) > 梭梭(35.8%) > 沙拐枣(33.3%) > 霸王(29.8%) > 柠条锦鸡儿(28.9%) > 杨柴(27.5%) > 小叶锦鸡儿(25.6%) > 花棒(19.5%) > 沙木蓼(14%)。在相同的条件下, 沙木蓼、花棒以及小叶锦鸡儿的水分饱和和亏低于其他 9 种灌木, 以水分饱和和亏为依据, 沙木蓼、花棒以及小叶锦鸡儿在受到水分胁迫时表现出较强的适应能力。

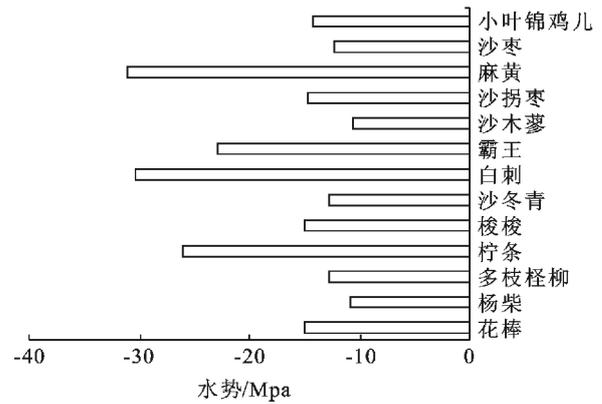


图 1 12 种沙生灌木水势比较

由表 1 可以看出, 12 种灌木的束缚水含量以及束缚水/自由水比值存在显著差异。霸王的束缚水含量最高, 其值为 64.2%, 其次为梭梭(56.4%), 再次为白刺(50.5%); V_a/V_s 比值最高的灌木为麻黄, 其值为 3.5, 再次为霸王(3.3), 柠条锦鸡儿的 V_a/V_s 比值位列第 3 位, 其值为 3.2。

由此可知, 霸王、梭梭以及白刺具有较高的束缚水和束缚水/自由水含量, 说明霸王、梭梭以及白刺具有较强的抗旱能力。

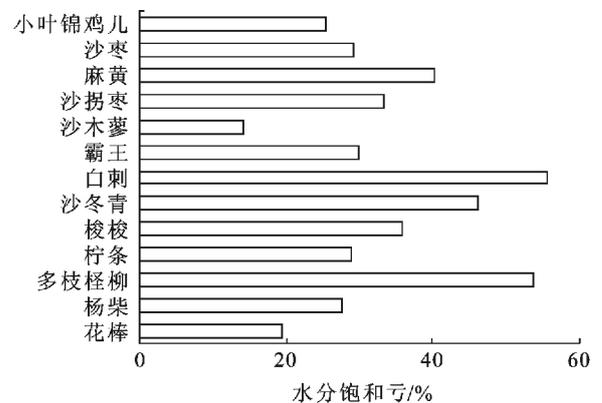


图 2 12 种沙生灌木水分饱和和亏比较

3.4 不同植物种蒸腾速率比较

蒸腾作用是植物消耗水分的主要途径, 它是植物叶片或茎上的气孔向外界扩散水分的过程。蒸腾速率是一个重要的植物散失水分的指标, 能反应植物潜在耗水能力的大小^[4], 与植物的抗旱性密切相关^[17-19]。由图 3 可以看出, 12 种灌木蒸腾速率由小

到大依次为沙木蓼[70.8 mmol/(m²·s)]<白刺[191.2 mmol/(m²·s)]<柽柳[248.0 mmol/(m²·s)]<柠条锦鸡儿[251.0 mmol/(m²·s)]<小叶锦鸡儿[296.0 mmol/(m²·s)]<沙拐枣[300.0 mmol/(m²·s)]<霸王[391.0 mmol/(m²·s)]<沙冬青[412.8 mmol/(m²·s)]<麻黄[525.0 mmol/(m²·s)]<梭梭[526.9 mmol/(m²·s)]<花棒[542.0 mmol/(m²·s)]<杨柴[824.1 mmol/(m²·s)]。在相同的条件下,沙木蓼、白刺以及柽柳的蒸腾速率显著低于其他 9 种灌木,以蒸腾速率为依据,沙木蓼、白刺以及柽柳具有较强的抵抗干旱条件的能力。

3.5 不同植物种抗脱水力比较

植物叶片的恒重时间(保持恒重时间)和残留含水率是植物抗脱水力能力的重要评价指标。由图 4 可以看出,梭梭与麻黄的恒重时间最长,均为 144 h,其次为花棒(106 h),再次为白刺和霸王,均为 100 h;

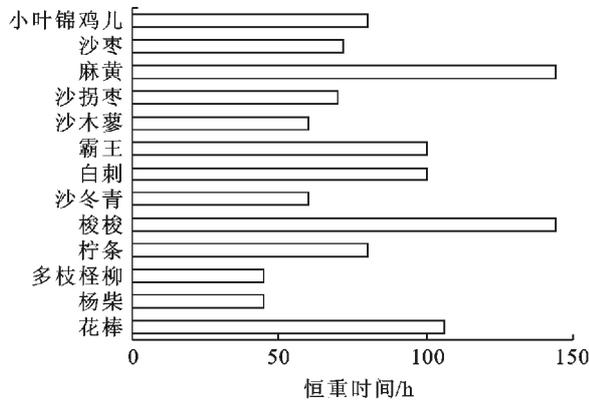


图 4 12 种沙生灌木抗脱水力比较

3.6 主成分分析

由于测定的作为植物抗旱性的指标很多,而这些指标间存在一定的相关性,因而所得统计数据反映的信息在一定程度上存在重叠,采用主成分分析,在原始组合中利用新转换组合的较少综合指标,能够较好地反映植物的抗旱性。

将 12 种植物的 7 个与抗旱性有关生理指标转化为 4 个主成分(表 2),前 4 个主成分的累积方差贡献率为 87.59%,表明前 4 个主成分已经把 12 种植物抗旱性的 87.59%的信息反映出来。其测定因子的载荷矩阵见表 3,由于第 4 个主成分贡献率仅为 8.90%,因此只选取前 3 个主成分中的较大特征向量。根据主成分分析,特征向量表示各性状对综合指标贡献的大小。由此可知,水势、束/自、残留含水率、束缚水、蒸腾速率这 6 个指标对乌兰布和荒漠生态系统沙生灌木的抗旱性的影响较大,可以选择这 6 个

沙冬青的残留含水率最高,其值为 44.8%,其次为霸王(33.5%),梭梭的残留含水率位列第 3 位,其值为 33.0%。以抗脱水力指标为依据,麻黄、梭梭、霸王以及花棒具有较强的保水能力,因此对于干旱环境的适应能力较强。

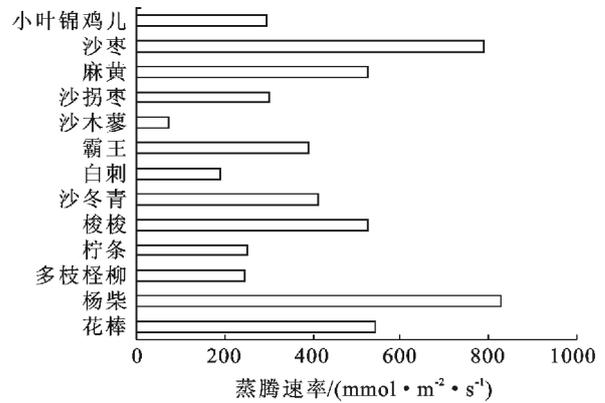
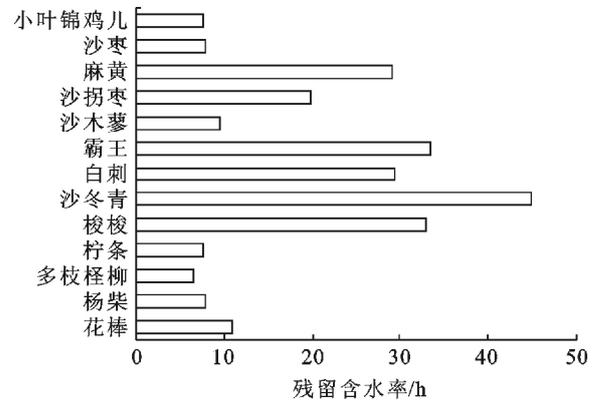


图 3 12 种沙生灌木蒸腾速率比较



指标对该区的沙生灌木进行抗旱性评价。

表 2 主成分分析统计结果

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.131	44.730	44.730
2	1.242	17.750	62.480
3	1.135	16.210	78.680
4	0.623	8.900	87.590

表 3 主成分分析中各测定因子的载荷矩阵

指标	主成分		
	1	2	3
水势	0.444	0.232	-0.349
束缚水	0.095	0.609	0.555
束/自	0.441	0.014	0.292
水分饱和亏	0.374	-0.229	0.445
蒸腾速率	-0.439	0.120	0.444
恒重时间	0.266	-0.638	0.258
残留含水率	0.442	0.317	-0.151

3.7 聚类分析

采用最短距离法在 SAS 9.0 软件中对数据进行聚类分析(图 5), 可将 12 种植物的抗旱性分为强、中、弱三类, 第 I 类(强)植物, 麻黄; 第 II 类(中)植物, 梭梭、白刺、霸王; 第 III 类(弱)植物, 花棒、杨柴、柺柳、柠条锦鸡儿、沙冬青、沙木蓼、沙拐枣、小叶锦鸡儿。

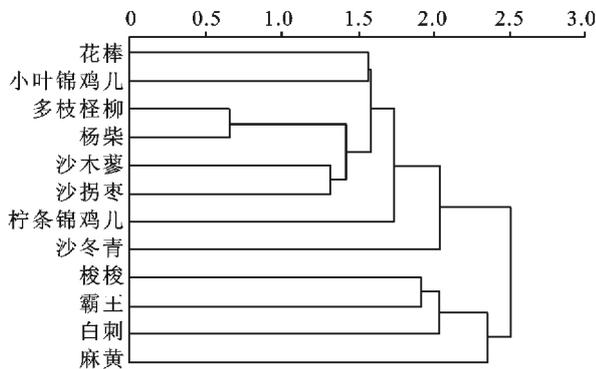


图 5 12 种植物抗旱性聚类图

4 讨论与结论

4.1 讨论

在干旱胁迫下, 抗旱性强的植物叶片相对含水量下降速度迟缓, 以维持植物体生理生化的正常运转^[20]。植物的抗旱能力非常复杂, 不仅受到多个基因控制, 还通过多个途径来实现, 是一个会受到多种因素影响的数量性状, 因此, 植物种不同, 对某一性状的水分胁迫反应也会有差异。同时, 不同植物种对干旱条件的差异与其自身生境也有密切的关系, 这是生境条件对植物自身抗旱调节能力作用的体现^[21]。

庄丽等^[22]研究表明, 植物的抗旱性是由自身结构及生理特征及外界环境共同决定的。林木抗旱性是其形态构造、水分生理生态特征、光合器官以及原生质结构特点的综合反应。植物种不同, 抗旱机制也存在差异, 某种植物在一个特定地区的抗旱能力是由其自身的生理抗性以及结构特性决定的。由于生理指标不同, 在植物抗旱水平上所体现出来的敏感度有差异, 因此如果试验选取不同的生理指标, 就会导致同一植物种的抗旱性评价结果不同。植物的抗旱性是一个综合性状, 受多种因素影响, 植物抗旱性是这些因素共同作用的结果, 因此, 植物抗旱性评价应用多个指标来进行综合评价^[23]。

植物进行抗旱性评价试验时, 有很多指标可以观测, 但是这些指标对植物进行抗旱性评价所起到的作用不同, 因此, 抗旱性指标的筛选对植物抗旱性评价起着至关重要的作用。主成分分析是一种较好的排

序方法, 因为植物抗旱性受外界环境因素影响较大, 在进行试验时, 应用此方法可以帮助我们选择合适的评价指标, 所以运用主成分分析对沙生灌木的抗旱性进行评价是切实可行的, 而聚类分析则能够依据抗旱性强弱将供试植物种分类。

今后对该地区 12 种灌木抗旱性进行全面评价时, 可结合盆栽试验, 以进一步完善 12 种灌木抗旱性评价鉴定指标体系, 为其在该地区的利用提供准确理论依据。

4.2 结论

(1) 麻黄、白刺以及柠条锦鸡儿的水势低于其他 9 种灌木; 霸王的束缚水含量和 V_a/V_s 比值较高, 分别为 64.2%, 3.3; 沙木蓼、花棒以及小叶锦鸡儿的水分饱和和亏低于其他 9 种灌木, 其值依次为 55.6%, 53.8%, 46.2%; 沙木蓼、白刺以及柺柳的蒸腾速率显著低于其他 9 种灌木; 梭梭与麻黄的恒重时间最长, 均为 144 h, 其次为花棒(106 h), 再次为白刺和霸王(100 h); 沙冬青的残留含水率最高, 其值为 44.8%, 其次为霸王(33.5%), 梭梭的残留含水率位列第三位(33.0%)。

(2) 通过主成分分析方法可知, 水势、束/自、残留含水率、束缚水、恒重时间、蒸腾速率这 6 个指标对乌兰布和荒漠生态系统 12 种沙生灌木的抗旱性的影响较大, 累积方差贡献率可达到 87.59%, 可以选择这 6 个指标对该区的沙生灌木进行抗旱性评价。

(3) 通过聚类分析将 12 种沙生灌木的抗旱性分三类, 强抗旱灌木为麻黄; 中抗旱灌木为梭梭、白刺、霸王; 弱抗旱灌木为花棒、杨柴、柺柳、柠条锦鸡儿、沙冬青、沙木蓼、沙拐枣、小叶锦鸡儿。

[参 考 文 献]

- [1] 邹琪. 植物生理实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 159-164.
- [2] 田英, 倪细炉, 于海宁, 等. 6 种抗旱灌木叶片形态解剖学特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(2): 113-117.
- [3] 师玉环. 浅谈沙生植物的生态适应性[J]. 生物学通报, 2010, 45(7): 14-15.
- [4] 张国盛. 干旱半干旱地区乔灌木树种耐旱性及林地水分动态研究进展[J]. 中国沙漠, 2000, 20(4): 363-368.
- [5] 周海燕. 荒漠沙生植物生理生态学研究展望[J]. 植物学通报, 2001, 18(6): 643-648.
- [6] 张建国. 树木耐旱特性及其机理研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [7] 种培芳, 苏世平, 高暎, 等. 4 个地理种群唐古特白刺的抗旱性系统评价[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 213-218.

(下转第 105 页)

堰塞堵断模式、渗混堵塞溃决模式、束窄渐进式堵塞模式。

(2) 对泥石流堵塞主河 3 种模式的运动与成灾机理进行了初步探索。顶冲堰塞堵断模式表现为龙头顶冲对岸、物源塞满主槽、脆弱区渗漏到主体垮塌的特征;渗混堵塞溃决模式表现为短时塞满主槽、水流渗混堵塞、流量加大的特征;束窄渐进式堵塞模式表现为主槽断面束窄、局部流量瞬时加大、渐进式局部堵塞的特征。

(3) 对历史泥石流堵河案例进行调查研究和典型性深入剖析。当前的历史堵河事件以束窄渐进式堵塞为主,与试验统计结果有较好的吻合。

(4) 不同流量比发生的堵河模式不同,堵塞主河程度也不同。当流量比小于 2.0 时,此时泥石流不堵或者部分堵河;当流量比大于 2.2 时,将发生泥石流全堵主河。

[参 考 文 献]

- [1] 匡尚富. 汇流部泥石流的特性和淤积过程的研究[J]. 泥沙研究, 1995, 3(1): 1-15.
- [2] 陈德明. 泥石流与主河水流交汇机理及其河床响应特征[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [3] 陈春光, 姚令侃, 杨庆华, 等. 基于堰流理论的泥石流堵河模型研究[J]. 自然灾害学报, 2012, 21(6): 131-135.
- [4] 陈春光, 姚令侃, 刘翠容. 泥石流堵河条件的研究[J]. 水利学报, 2013, 44(6): 648-656.
- [5] 刘翠容, 姚令侃. 泥石流堵塞大河的特点及异岸受灾判据研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(5): 93-100.
- [6] Liu Cuirong, Du Cui. Characteristic and criteria of debris flow partially blocking big river [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2014, 33(1): 79-84.
- [7] 王峥嵘, 邓辉, 黄润秋. 格地罗沟高频泥石流特征及成因机制研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(5): 1198-1202.
- [8] 曾超, 崔鹏, 葛永刚, 等. 四川汶川七盘沟“7·11”泥石流破坏建筑物的特征与力学模型[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(2): 81-91.
- [9] 彭秀红, 徐佩华. 柳杨沟泥石流特征及其工程影响分析[J]. 工程地质学报, 2007, 15(3): 374-379.
- [10] 朱平一, 程尊兰, 游勇, 等. 川藏公路培龙沟泥石流输砂堵江成因探讨[J]. 自然灾害学报, 2000, 9(1): 80-83.
- [11] 宋志, 巴仁基, 刘宇杰. 磨西河特大型泥石流堵塞大渡河分析: 以一次泥石流规模、不同频率雨洪法流量定量计算[J]. 灾害学, 2010, 25(3): 71-73.
- [12] 地矿眉山工程勘察院. 四川省雅安市石棉县广元堡泥石流治理工程补充勘查报告[R]. 四川 眉山: 地矿眉山工程勘察院, 2011.
- [13] 李禄军, 蒋志荣, 李正平, 等. 3 树种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 252-254.
- [14] 李清河, 王赛宵, 徐军, 等. 几种沙生灌木的抗旱性综合评价[J]. 中国农学通报, 2012, 28(13): 103-108.
- [15] 赖声渭, 曹兵. 浅谈林木抗旱性评价方法[J]. 防护林科技, 2002(3): 48-49.
- [16] 郭连生, 田有亮. 4 种针叶幼树光合速率、蒸腾速率与土壤含水量的关系及其抗旱性研究[J]. 应用生态学报, 1994, 5(1): 32-36.
- [17] 郝再彬, 苍晶, 徐仲, 等. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 22-25.
- [18] 孙书存, 陈灵芝. 东灵山地区辽东栎叶的生长及其光合作用[J]. 生态学报, 2000, 20(2): 212-217.
- [19] Tilman D. Plant strategies and the Structure and Dynamics of Plant Communities[M]. Princeton: Princeton University Press, 1988: 52-97.
- [20] 李雪华, 蒋德明, 阿拉木萨, 等. 科尔沁沙地 4 种植物抗旱性的比较研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1385-1388.
- [21] 孙启忠. 略论与植物抗旱性有关的问题[J]. 牧草与饲料, 1991(1): 6-10.
- [22] 宋凤斌, 徐世昌. 玉米抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(1): 127-129.
- [23] 万小荣, 李玲. 脱水胁迫下抗旱性不同花生品种中某些生理生化指标变化比较[J]. 植物生理学通讯, 2006, 42(6): 1117-1118.
- [24] 蒋志荣, 杨占彪, 汪君, 等. 兰州九州台四种绿化树种抗旱性机理比较研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 553-558.
- [25] Marshall J, Rutledge R, Uluwald E, et al. Reduction in turgid water volume in jack pine, white spruce and black spruce in response to drought and paclobutrazol [J]. Tree Phkysiol, 2000(20): 701-707.
- [26] Saitoh K, Kikuir M, Ishihara K. Relationship between leaf movement of trifoliolate compound leaf and environmental factors in the soybean canopy[J]. Japanese Journal of Crop Science, 1995, 64(2): 259-265.
- [27] 庄丽, 陈亚宁, 陈明, 等. 模糊隶属法在塔里木河荒漠植物抗旱性评价中的应用[J]. 干旱区地理, 2005, 28(3): 368-372.
- [28] 王琰, 狄晓艳, 马建平, 等. 8 个油松种源抗旱性的比较研究[J]. 水土保持通报, 2009, 29(4): 46-50.

(上接第 99 页)