

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.06.019

## 干旱胁迫对治沙植物形态结构和生理特征的影响

陈德朝<sup>1</sup>, 邹玉和<sup>1</sup>, 鄢武先<sup>1</sup>, 邓东周<sup>1</sup>, 贺丽<sup>1</sup>, 吴世磊<sup>1</sup>,  
余凌帆<sup>1</sup>, 杨靖宇<sup>1</sup>, 张利<sup>2</sup>, 段雪梅<sup>1</sup>, 颜金燕<sup>3</sup>

(1. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081; 2. 阿坝州林业科学技术研究所, 四川 阿坝 623000;  
3. 阿坝职业学院, 四川 阿坝 623000)

**摘要:**在防沙治沙的过程中, 生物治沙占据着主导地位, 治沙植物长期处于干旱、日照强、沙埋、风沙大、温差大等恶劣环境下, 会逐渐在结构上及生理上形成适应旱生的特征, 本文总结概述治沙植物形态结构和生理特征, 为筛选治沙植物提供参考依据。

**关键词:**荒漠化治理; 植物治沙; 形态结构; 生理特征; 植物筛选

中图分类号: S727.23

文献标识码: A

文章编号: 1003-5508(2018)06-0081-05

## Effects of Drought Stress on Ecological Structure and Physiological Characteristics of Sand-control Plants

CHEN De-chao<sup>1</sup> ZOU Yu-he<sup>1</sup> YAN Wu-xian<sup>1</sup> DENG Dong-zhou<sup>1</sup> HE Li<sup>1</sup> WU Shi-lei<sup>1</sup>  
YU Ling-fan<sup>1</sup> YANG Jing-yu<sup>1</sup> ZHANG Li<sup>2</sup> DUAN Xue-mei<sup>1</sup> YAN Jin-yan<sup>3</sup>

(1. Sichuan Academic of Forestry, Chengdu 610081, China; 2. Sichuan Aba Forestry Science and Technology  
Research Institute, Wenchuan 623000, China; 3. Aba Vocational College, Wenchuan 623000, China)

**Abstract:** Biological control plays a dominant role in the process of controlling desertification. The sand-control plants will gradually form the morphological structure and physiological characteristics adapting to drought under the harsh environment of drought, strong sunshine, poor soil, large wind and sand, low temperature and so on. Morphological structure and physiological characteristics will be elaborated for plant screening.

**Key words:** Desertification control, Sand-control plants, Morphological structure, Physiological characteristics, Plant screening

土地荒漠化是当前全球广泛关注的重大环境问题之一, 中国是世界上受沙漠化威胁最为严重的国家之一<sup>[1~2]</sup>。根据国家林业局第四次全国荒漠化监测结果显示: 全国荒漠化土地总面积 262.37 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 27.33%, 全国沙化土地面积

为 173.11 万 km<sup>2</sup>, 占国土总面积的 18.03%<sup>[3]</sup>。我国每年因荒漠化问题造成的生态和经济损失超过 650 亿元, 将近 4 亿人直接或间接受到荒漠化问题的困扰, 严重制约我国生态安全和可持续发展的社会发展<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2018-09-03

基金项目: 四川省财政专项 - 生态经济型治沙植物选择及模式研究(2018CZZX01); 国家科技支撑计划 - 川西北藏区高寒沙地适生治沙灌木材料培育及示范(2015KJZC05)。

作者简介: 陈德朝(1986-), 男, 河北人, 硕士研究生, 主要从事林学, 恢复生态相关研究, e-mail: cdc519@qq.com。

目前,国内外在防沙治沙中主要采取生物措施与工程措施相结合的治理理念<sup>[5]</sup>。生物措施,即植物治沙,实施植树造林治沙、封沙育林育草、退耕还林还草等措施来增加植被盖度;工程治沙,采取柴草沙障、沙障压沙、黏土覆沙等措施来固定沙质和减少风沙活动<sup>[6-7]</sup>。与其他治沙方法相比,植物治沙是防治土地荒漠化最有效的途径。植物治沙最重要的是治沙植物的选择,治沙植物即用于沙化土地治理,固定沙化土地的乔灌木、藤本和草本。治沙植物具耐干旱、耐高温、耐沙埋、耐贫瘠、耐盐碱、抗沙蚀等特点<sup>[8-9]</sup>。本文通过对治沙植物主要形态结构和生理特征进行归纳和总结,希望为治沙植物选择相关研究提供参考和借鉴,并引起荒漠化防治领域对植物研究的关注。

## 1 治沙植物主要形态结构

### 1.1 茎、叶形态特征

治沙植物长期处于干旱、日照强、土壤贫瘠、风沙大、温差大等恶劣环境下,会逐渐在结构上及生理上形成适应特征。

植物叶片的解剖结构特征反映了植物对水分的保持能力和对生长环境的适应能力,是评价植物抗旱性的一个重要指标<sup>[10-11]</sup>。植物叶片解剖结构对沙生环境的适应表现在:(1)叶片的表面积与体积的比值普遍偏小,这主要是减少蒸腾面积,将蒸腾作用降到最低程度<sup>[12]</sup>。(2)叶片表面常覆盖有较厚的角质层,这一特征不仅能降低蒸腾、抑制水分散发,还能在植物缺水时提供支撑作用,使植物不会立即萎蔫,增强植物的抗旱性<sup>[13]</sup>。(3)栅栏薄壁组织增多。发达的栅栏组织能保护叶肉避免强光照的损伤,保证光合作用的正常进行<sup>[14]</sup>。沙生植物银沙槐(*Ammodendron argenteum*)、菟丝黄芪(*Astragalus lehmannianus*)和小沙冬青(*Ammopiptanthus nanus*)的叶片两面都具有栅栏组织<sup>[15]</sup>。紧密的栅栏组织还可以提高光合作用的效率,是在长期的干旱环境下形成一套抵御干旱的形态机制。(4)叶片气孔下陷,有较大的孔下室,叶片表面具有表皮毛。研究表明植物具有较大的孔下室,可造成较湿的小环境,从而抑制了叶肉细胞蒸腾水分<sup>[12]</sup>,表皮毛则具有良好的隔水保水功能。

植物的抗旱性还表现在:(1)茎和根中具有发

达的机械组织和输导组织。发达的机械组织可以抵御干旱区风大沙多所造成的损伤,输导组织则可以增强植物储藏和运输水分的能力,以适应干旱环境条件<sup>[16]</sup>。(2)器官内普遍存在黏液细胞与结晶。黏液物质的存在增大了细胞的渗透势,从而提高了细胞的吸水能力<sup>[17]</sup>。

基于以上的特点,可以选择叶片厚度、角质层厚度、上层栅栏组织和下层栅栏组织厚度作为抗旱性主要鉴定指标<sup>[18]</sup>。

### 1.2 根形态特征

根是植物吸收水分和养分的主要器官。随着生境的变化,根的形态和结构往往表现出一定的可塑性,形成独特的根系构型。根系的构型特征可以通过根系几何、形态特征参数和拓扑结构来描述:几何形态特征参数包括根长、根重和角度等;根系拓扑结构则反映根系的分支状况,连接数量以及根系在土层中的空间分布等<sup>[19]</sup>。目前根系的拓扑结构的研究已成热点问题<sup>[20]</sup>。

Fitter等首先提出根系拓扑结构有两种极端类型:鱼尾状分支和叉状分支模式<sup>[21]</sup>。通过比较不同分支模式根系对营养物质的竞争能力,认为鱼尾形分支更适于生长在资源相对贫乏的生境;而叉状根系更多地出现于一些生境养分相对丰富且快速生长的物种<sup>[22]</sup>。

单立山等对分布在戈壁、荒漠和黄土区的红砂(*Reaumuria songarica*)根系构型研究表明,随着干旱程度增加,红砂根系分支能力减弱,次级分支和根系重叠减少,根系连接长度增加,分支由叉状分枝向鱼尾状分支发展<sup>[23]</sup>。杨小林等研究表明:塔克拉玛干沙漠腹地3种植物根系的连接长度都较大,最小也达1.12 m,说明3种植物通过增加连接长度来扩大根系在土层中的分布范围,从而提高根系的有效营养空间,增加根系连接长度是根系对沙漠腹地贫瘠土壤环境的一个良好适应<sup>[24]</sup>。

### 1.3 资源分配策略

当植物受到胁迫时,一般会调整其资源分配来尽量减少逆境对生长发育造成的影响。在干旱胁迫下,植物将更多资源投资于地下部分,生物量优先向根系分配,根冠比增大,这表现了植物适应干旱逆境的一种“开源”策略。沙生苔草(*Carex praeclara*)对地下构件投资大于地上部分,根茎含水量和生物量配比显著高于其他器官,将水分和养分蓄积在根茎

或基茎,为促进分枝和增大冠幅奠定了物质基础<sup>[25]</sup>。同理,随着干旱程度加剧,油蒿(*Artemisia ordosica* Krasch)的根冠比呈增大的趋势。油蒿在干旱情况下,增加对根的投入,从而增加根长以利用更深层土壤的资源,同时增加根系吸收表面积,使植物更有效地吸收土壤中的水分,以增强对水分的获取能力<sup>[26]</sup>。

## 2 胁迫下治沙植物生理特征

### 2.1 相对电导率

当植物受到干旱、极端温度、沙埋等逆境胁迫时,体内会发生一系列的生理生化反应来抵御各种胁迫。植物体内存在着多种内源活性氧,如超氧阴离子自由基( $O_2^-$ )、过氧化氢( $H_2O_2$ )、单线态氧( $^1O_2$ )、羟自由基( $\cdot OH$ )和高羟自由基( $O_2H^\cdot$ )等,这些物质具有超强的氧化能力,大量积累会损伤植物细胞结构和功能<sup>[27-28]</sup>。正常情况下,植物体内的自由基会处在一个动态平衡中,不会对植物造成伤害。但当植物遭受逆境时,平衡被打破,会造成自由基的积累,导致膜脂过氧化,膜透性增强,最终导致细胞死亡<sup>[29-30]</sup>。目前,细胞膜透性变化已经成为植物抗逆研究中反映受损程度的一个公认指标<sup>[31]</sup>。

相对电导率能够表示细胞膜透性的大小,可以反映植物细胞膜在逆境条件下透性的变化和受损伤程度。干旱胁迫会导致细胞质膜受损,膜选择透性功能下降,电解质外渗<sup>[32]</sup>。通过测定外渗液电导率的变化能够反映出质膜的受损程度和植物抗逆性的大小。通常认为,在持续干旱作用下,植物的抗旱性越强电导率上升幅度越小。刘金龙对5种牧草叶片的相对电导率研究表明,随干旱天数的增加,叶片相对电导率均明显上升<sup>[33]</sup>。

### 2.2 丙二醛

丙二醛(MDA)是膜脂过氧化的终产物之一。因此,MDA含量的多少可以代表植物细胞遭受逆境伤害的程度<sup>[34]</sup>。对两种不同耐旱性的鸭茅基因型进行研究发发现:干旱胁迫下2个基因型的根系和叶片MDA含量呈不断增加趋势,并随着干旱胁迫时间的延长而加剧<sup>[35]</sup>。但是植物膜受伤害的轻重不能仅用MDA积累的绝对量衡量,还需考虑植物细胞膜忍受膜脂过氧化的能力,如果细胞膜对膜脂过氧化作用的耐受力高,即使MDA积累较多,其膜受

损也会较轻。赵哈林<sup>[36]</sup>研究发现随着沙埋深度的增加,沙蓬(*Agriophyllum squarrosum*)幼苗MDA含量急剧增加,但膜透性增长缓慢;盐蒿(*Artemisia halodendron*)幼苗的MDA含量呈波动式缓慢变化,膜透性却大幅度增加;沙埋后差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)幼苗的MDA含量低于对照,而膜透性则总体呈现明显增加趋势。这也说明了膜透性变化与膜质过氧化虽然存在一定关系,但并不完全决定于MDA增加。

### 2.3 抗氧化保护酶系统

逆境条件下,为了避免或减轻细胞受损,植物主动或被动调动抗氧化保护酶类(超氧化物歧化酶SOD、过氧化物酶POD和过氧化氢酶CAT),通过相互协调、共同作用来清除活性氧和氧自由基,防止膜脂过氧化,降低膜脂过氧化所产生的MDA<sup>[28,37]</sup>。其中,SOD酶是氧自由基代谢的关键酶,能将 $O_2^-$ 清除氧化成 $H_2O_2$ 和 $O_2$ ,POD和CAT酶能够协助SOD,将 $H_2O_2$ 转变为 $H_2O$ 和 $O_2$ <sup>[38]</sup>。植物的抗逆性与其保护酶活性强弱能力有密切相关。SOD、POD和CAT3种酶活性与植物耐旱性关系密切,可作为植物抗旱性生理指标<sup>[39]</sup>。Bowler<sup>[40]</sup>指出抗逆性强的植物在逆境条件下能使保护酶活力维持在一个较高水平,有利于清除自由基,降低膜脂过氧化水平,从而减轻膜伤害程度。研究表明在干旱胁迫下,以6种典型山地灌木为研究对象,其叶片中的SOD酶的活性呈现先升高再下降的趋势,POD和CAT保护酶活性不断升高。值得注意的是,其中SOD酶活性的升高主要发生胁迫初期,POD酶活性在整个胁迫期间表现为持续缓慢升高,CAT酶活性的升高则主要发生在胁迫的中后期。不同胁迫时期植物体内起主导作用的保护酶系统不同,3者表现为相互协调的作用方式<sup>[41]</sup>。不同的植物体内3种酶对逆境胁迫的响应存在一定差异,有研究发现差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)在25%和50%沙埋处理下,只有POD一种酶活性增强,而在75%和100%沙埋处理下则是POD和SOD,或SOD和CAT两种酶活性增强。而小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)从25%沙埋到50%沙埋,是由一种酶活性增强变为3种酶活性同时增强,但75%沙埋处理下又转变为只有一种酶活性增强,这种酶活性协调作用的转变可能是重度和严重沙埋情况下差巴嘎蒿耐沙埋能力强于小叶锦鸡儿的一种重要逆境生理机制<sup>[42]</sup>。

## 2.4 渗透调节物质脯氨酸、可溶性糖

植物在抵御不良环境时,除了抗氧化保护酶系统,自身还会及时进行渗透调节。渗透调节物质(脯氨酸 Pro、可溶性糖、可溶性蛋白等)的积累可以调节细胞内的渗透势,防止细胞质的渗漏,维持水分平衡,保护细胞内重要代谢活动所需的酶类活性,可以作为抗旱性鉴定的生理指标<sup>[43]</sup>。一般认为抗旱性强的品种渗透调节能力较强<sup>[44]</sup>。研究发现干旱胁迫下,4种观赏草叶片中可溶性蛋白呈现出先上升后下降趋势,且抗旱性强的草种其增加量大于抗旱性弱的草种。高含量的可溶性蛋白质有助于维持植物细胞较低的渗透势水平、增强耐脱水能力、保护细胞结构并且延缓衰老,以抵御干旱胁迫引起的伤害<sup>[45]</sup>。季杨<sup>[35]</sup>等以两种不同耐旱性的鸭茅基因型(敏感型“01998”和耐旱型“宝兴”)为研究对象,发现相较于敏感型材料“01998”,耐旱型品种“宝兴”根系及叶片的脯氨酸含量和可溶性糖含量在整个干旱期间增幅更明显,表明“宝兴”根系及叶片内脯氨酸和可溶性糖响应于旱代谢系统更为敏感和快速。

综上所述,植物的抗旱性能是一个复杂的综合性状,是从植物的形态解剖构造、生理生态特征及生理生化反应到细胞及原生质结构特点的综合反映。在干旱胁迫下,治沙植物形态特征主要表现为叶片的表面积变小,叶片表面覆盖有较厚的角质层,栅栏薄壁组织增多,叶片气孔下陷,有较大的孔下室;根系呈鱼尾形,生物量分配优先分配根系,根冠比增大,茎和根具有发达的机械组织和输导组织,器官内普遍存在黏液细胞与结晶。生理特征及评价指标主要为相对电导率、丙二醛(MDA)、抗氧化保护酶系统、渗透调节物质脯氨酸、可溶性糖,不同治沙植物通过各种生理变化来适应干旱胁迫。在治沙植物选择工作中可以对文中讨论的指标进行筛选和评价,筛选出适地适区域的治沙植物。

### 参考文献:

- [1] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄:河北科学技术出版社, 1997.
- [2] 慈龙骏. 中国荒漠化及其防治[M]. 北京:高等教育出版社, 2005.
- [3] 国家林业局. 第四次中国荒漠化和沙化状况公报[N]. 中国绿色时报, 2011-01-05(A02).
- [4] 包岩峰, 杨柳, 龙超, 等. 中国防沙治沙60年回顾与展望[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(02): 144~150.
- [5] 鄢武先, 邓东周, 余凌帆, 等. 川西北地区沙化土地治理有关技术问题探讨——以川西北防沙治沙试点示范工程为例[J]. 四川林业科技, 2015, 36(03): 62~68.
- [6] 赵廷宁, 丁国栋, 王秀茹, 等. 中国防沙治沙主要模式[J]. 水土保持研究, 2002(03): 118~123.
- [7] 赵润林, 潘凌安. 辽宁西北部地区沙化和荒漠化土地治理技术研究[J]. 防护林科技, 2006(05): 30~32.
- [8] 贺丽, 钟成刚, 邓东周, 等. 高寒沙区草地植被恢复及重建途径研究进展[J]. 四川林业科技, 2014, 35(06): 32~37.
- [9] 肖萌. 基于沙区环境的几种灌草植物种子萌发及出苗特性研究[D]. 北京林业大学, 2014.
- [10] 葛奕, 黄冬, 马焕成, 等. 云南干热河谷不同居群柳叶片的旱生结构比较[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(05): 138~143.
- [11] 李欢, 樊军锋, 高建社, 等. 黑杨叶片旱生结构的比较[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(03): 113~118.
- [12] 黄振英, 吴鸿, 胡正海. 30种新疆沙生植物的结构及其对沙漠环境的适应[J]. 植物生态学报, 1997(06): 34~43.
- [13] 燕玲, 李红, 刘艳. 13种锦鸡儿属植物叶的解剖生态学研究[J]. 干旱区资源与环境, 2002(01): 100~106.
- [14] Fahmy G M. Leaf anatomy and its relation to the ecophysiology of some non-succulent desert plants from Egypt [J]. Journal of Arid Environments, 1997, 36(3): 499~526.
- [15] 黄振英, 吴鸿, 胡正海. 新疆10种沙生植物旱生结构的解剖学研究[J]. 西北植物学报, 1995(06): 56~61.
- [16] 王彦淇, 丁岩, 李璐, 等. 元江干热河谷不同居群猪屎豆营养器官旱生结构比较[J]. 西南林业大学学报, 2017, 37(01): 66~72+81.
- [17] 宋玉霞, 于卫平, 王立英, 等. 贺兰山10种不同植物的旱生结构研究[J]. 西北植物学报, 1997(05): 61~68.
- [18] 徐扬, 陈小红, 赵安玖. 川西高原4种苹果属植物叶片解剖结构与其抗旱性分析[J]. 西北植物学报, 2015, 35(11): 2227~2234.
- [19] 杜建会, 刘安隆, 董玉祥, 等. 华南海岸典型沙生植物根系构型特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(08): 888~895.
- [20] 郭京衡, 曾凡江, 李尝君, 等. 塔克拉玛干沙漠南缘三种防护林植物根系构型及其生态适应策略[J]. 植物生态学报, 2014, 38(01): 36~44.
- [21] Fitter AH. The topology and geometry of plant root systems: influence of watering rate on root system topology in *Trifolium pratense* [J]. Annals of Botany, 1986, 58, 91~101.
- [22] Fitter AH. An architectural approach to comparative ecology of plant root systems[J]. New Phytologist, 1987, 106, 61~77.
- [23] 单立山, 李毅, 董秋莲, 等. 红砂根系构型对干旱的生态适应[J]. 中国沙漠, 2012, 32(05): 1283~1290.
- [24] 杨小林, 张希明, 李义玲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地3种植物根系构型及其生境适应策略[J]. 植物生态学报, 2008(06): 1268~1276.
- [25] 李莹, 曾晓琳, 游明鸿, 等. 5种川西北沙化地草本植物生态适应策略的差异性[J]. 草业科学, 2016, 33(05): 843~850.

- [26] 王林龙. 干旱胁迫及沙埋对沙生植物表型可塑性的影响[D]. 中国林业科学研究院, 2015.
- [27] 余叔文, 汤章城. 植物生理与分子生物学[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [28] 何建社, 张利, 刘千里, 等. 岷江干旱河谷区典型灌木对干旱胁迫的生理生化响应[J]. 生态学报, 2018, 38(07): 2362 ~ 2371.
- [29] 陈少裕. 膜脂过氧化对植物细胞的伤害[J]. 植物生理学通讯, 1991(02): 84 ~ 90.
- [30] 汤坤贤, 陈慧英, 陈玉珍, 等. 干旱胁迫对3种海岛植被修复植物生长与生理指标的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2017, 56(06): 845 ~ 851.
- [31] 王进. 几种沙生植物耐沙埋的生理生态学机制研究[D]. 鲁东大学, 2012.
- [32] 孙铁军, 苏日古嘎, 马万里, 等. 10种禾草苗期抗旱性的比较研究[J]. 草业学报, 2008(04): 42 ~ 49.
- [33] 刘金龙, 王莹, 许爱云, 等. 干旱胁迫下5种禾本科牧草幼苗期的生理特性[J]. 草业科学, 2018, 35(05): 1106 ~ 1115.
- [34] 丁玉梅, 马龙海, 周晓罡, 等. 干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸、丙二醛含量变化及与耐旱性的相关性分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(01): 106 ~ 110.
- [35] 季杨, 张新全, 彭燕, 等. 干旱胁迫对鸭茅根、叶保护酶活性、渗透物质含量及膜质过氧化作用的影响[J]. 草业学报, 2014, 23(03): 144 ~ 151.
- [36] 赵哈林, 曲浩, 周瑞莲, 等. 沙埋对两种沙生植物幼苗生长的影响及其生理响应差异[J]. 植物生态学报, 2013, 37(09): 830 ~ 838.
- [37] 裴斌, 张光灿, 张淑勇, 等. 土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(05): 1386 ~ 1396.
- [38] K. V. Chaitanya, D. Sundar, S. Masilamani, A. Ramachandra Reddy. Variation in heat stress-induced antioxidant enzyme activities among three mulberry cultivars [J]. Plant Growth Regulation, 2002, 36(2).
- [39] 吴永波, 叶波. 高温干旱复合胁迫对构树幼苗抗氧化酶活性和活性氧代谢的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(02): 403 ~ 410.
- [40] Bowler C, And M V M, Inze D. Superoxide Dismutase and Stress Tolerance[J]. Annu. rev. plant Physiol. plant Mol. biol, 1992, 43(1): 83 ~ 116.
- [41] 范苏鲁, 苑兆和, 冯立娟, 等. 干旱胁迫对大丽花生理生化指标的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(03): 651 ~ 657.
- [42] 赵哈林, 曲浩, 周瑞莲, 等. 沙埋对两种灌木生长影响及其生理响应差异[J]. 草业学报, 2014, 23(01): 185 ~ 191.
- [43] 潘昕, 邱权, 李吉跃, 等. 干旱胁迫对青藏高原6种植物生理指标的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(13): 3558 ~ 3567.
- [44] 潘昕, 李吉跃, 王军辉, 等. 干旱胁迫对青藏高原4种灌木生理指标的影响[J]. 林业科学研究, 2013, 26(03): 352 ~ 358.
- [45] 李秀玲, 刘开强, 杨志民, 等. 干旱胁迫对4种观赏草枯叶率及生理指标的影响[J]. 草地学报, 2012, 20(01): 76 ~ 82.

## (上接第70页)

- [7] 林柳, 金延飞, 杨鸿培, 等. 西双版纳亚洲象的栖息地评价[J]. 兽类学报, 2015, 35(1): 1 ~ 13.
- [8] 李佳, 李言阔, 缪沪君, 等. 江西桃红岭国家级自然保护区梅花鹿生境适宜性评价[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1274 ~ 1283.
- [9] 冉江洪, 刘少英, 王鸿加, 等. 小相岭大熊猫栖息地干扰调查[J]. 兽类学报, 2004, 24(4): 277 ~ 281.
- [10] 刘士华, 高信芬, 涂卫国, 等. 彭州白水河国家级自然保护区植物群落 $\alpha$ 多样性的海拔梯度变化[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 303 ~ 307.
- [11] 刘士华. 彭州市白水河自然保护区生物多样性及种子植物区系研究[D]. 中国科学院研究生院(成都生物研究所), 2007.
- [12] 张强, 兰盛军, 胡大明, 等. 四川白水河国家级自然保护区野外藏酋猴活动初步调查[J]. 四川动物, 2008, 27(1): 131 ~ 134.
- [13] Phillips S J, Anderson R P, Schapire R E. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecological Modelling, 2006, 190(3): 231 ~ 259.
- [14] Manel, Stéphanie, Williams, H. Ceri, Ormerod, S. J. Evaluating presence-absence models in ecology: the need to account for prevalence [J]. Journal of Applied Ecology, 2010, 38(5): 921 ~ 931.
- [15] Lawler J J, Wiersma Y F, Huettmann F. Using Species Distribution Models for Conservation Planning and Ecological Forecasting [M] Predictive Species and Habitat Modeling in Landscape Ecology, 2011: 271 ~ 290.
- [16] Pearce, J. S. Ferrier, Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression [J]. Ecological Modelling, 2000, 133(3): 225 ~ 245.
- [17] 王素芬, 郑忻全, 张哲彰, 应用生态系经营决策支援系统于野生动物栖息地适宜性之评估 [J]. Jour. Exp. For. Nat. Taiwan Univ, 2004, 19(1): 69 ~ 76.
- [18] Wang Y, Önal H. Optimal design of compact and connected nature reserves for multiple species [J]. Conservation Biology, 2016, 30(2): 413 ~ 424.
- [19] 呼延俊奇, 肖静, 于博威, 等. 我国自然保护区功能分区研究进展 [J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6391 ~ 6396.
- [20] Zeng Z G, Beck P S A, Wang T J, et al. Effects of plant phenology and solar radiation on seasonal movement of golden takin in the Qinling Mountains, China. [J]. Journal of Mammalogy, 2010, 91(1): 92 ~ 100.
- [21] 官天培, 湛利民, 郑维超, 等. 四川羚牛春季地形选择特征的初步研究 [J]. 动物学杂志, 2015, 50(3): 329 ~ 336.
- [22] Xu W H, Wang X Z, Ouyang Z Y, et al. Conservation of giant panda habitat in South Minshan, China, after the May 2008 earthquake. [J]. Frontiers in Ecology & the Environment, 2009, 7(7): 353 ~ 358.