

# 基于灰色关联分析三峡库区重庆段生态安全

魏兴萍<sup>1,2</sup>

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院 GIS 应用研究重庆市重点实验室, 重庆 400047; 2. 西南大学 地理科学学院, 重庆 400715)

**摘要:**随着经济建设的发展,人们对居住的生态环境提出了更高的要求,以三峡库区重庆段为例,基于压力—状态—响应概念模型,引进灰色系统理论的灰色关联分析方法从20个指标分析了重庆三峡库区自直辖以来的生态安全问题。在灰色关联分析时引入了熵权和AHP的平均值作为权重,使评价更为合理。结果表明:1997年和1998年三峡库区重庆段的生态安全呈病态,1999—2007年三峡库区重庆段生态安全呈不健康状态。从资源环境压力来看,1997年处于病态,1998—2007年为不健康状况;从资源环境状态来看,1997年处于不健康,1998—2000年处于病态,2001—2007年处于不健康状况;从人文环境响应来看,1997—2003年均处于病态,2004年处于不健康,2005—2007年处于亚健康状态。因此总的来讲,三峡库区重庆段生态安全趋于好转,但是生存环境欠佳,需要采取措施尽快改善。

**关键词:**灰色关联分析;三峡库区重庆段;生态安全

中图分类号:X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)04-0124-05

## Ecological Security Assessments of Three Gorges Reservoir area in Chongqing Based on Gray Relational Analysis

WEI Xing-ping<sup>1,2</sup>

(1. College of Geography and Tourism, Key Laboratory of GIS Application, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China; 2. School of Geographic Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** With the development of economic construction, people have higher requirements for the living environment. The paper took the Three Gorges reservoir area in Chongqing as an example and analyzed the eco-security issues based on press-states-response model from 20 indicators with the gray relational analysis in the gray system theory since 1997. Gray relational analysis made the results more reasonable because it used the average value between entropy method and AHP as comprehensive weight value. The results showed that: the ecological security of Three Gorges reservoir area in Chongqing was sick both 1997 and 1998, while it was unhealthy state from 1999 to 2007. The situation of the resources environmental pressure was sick in 1997 and was unhealthy from 1998 to 2007. The situation of the resources environmental state was unhealthy in 1997, from 2001 to 2007 and was sick from 1998 to 2000. The situation of human environment response was sick from 1997 to 2003 and was unhealthy in 2004 and was sub-healthy from 2005 to 2007. Therefore, ecological security of the Three Gorges reservoir area in Chongqing approaches to improve the poor living environment, however, needs to take measures to improve better as soon as possible.

**Key words:** gray relational analysis; Three Gorges reservoir area in Chongqing; ecological security

生态安全是指人在生活、健康、基本权利、生活保障来源、必要资源、社会秩序和人类适应环境变化的能力等方面不受威胁的状态,是一个复合生态安全系统<sup>[1-2]</sup>。生态安全概念的提出,引起了国内外学者的广泛关注。他们的研究集中在对生态安全概念的探索、

安全评价指标选取等方面。这些研究多针对区域、国家生态安全或农业生态安全状况而言,而针对城市生态安全的系统深入研究较少。目前城市生态的评价方法有综合评价法、物元评判法、层次分析法、熵权灰色关联度法等方法<sup>[3-6]</sup>,这些方法都易将问题简单化,带

收稿日期:2010-03-16

资助项目:重庆市委项目(CSTC 2007BC7001, CSTC2009BA0002);国家科技支撑计划课题(2006BAC01A16);国家自然科学基金(40801077);教育部重点项目(209100);重庆市自然科学基金(CSTC, 2008BB7367);科技部国际合作项目(2008GR1256);西南大学研究生创新基金项目(kb2009004, ky2008001)

作者简介:魏兴萍(1975—),女,四川广安人,博士生,讲师,主要从事资源环境与地理信息系统研究。E-mail: xingpingwei@126.com

有一定的主观性或只考虑客观因素,过于片面。

本文选用区域生态安全评价方法中的灰色关联度法,基于压力—状态—响应(PSR)概念模型,构建了 3 个层次,20 个指标的三峡库区重庆段生态安全评价指标,运用层次分析法与熵权法的平均值对各指标赋权,结合灰色关联度法对三峡库区重庆段生态安全进行关联度分析,得出自直辖以来,重庆三峡库区的生态安全的变化,以及压力—状态—响应模式的生态安全变化。运用层次分析法和熵权法的平均值赋权值,可以最大限度地降低主观因素和数据偶然性导致与事实不符的现象,使分析结果更为合理。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区的概况

重庆库区包括重庆市主城 7 区和国务院批准的《三峡库区经济社会发展规划》中的巫山、巫溪、奉节、云阳、开县、万州、忠县、石柱、丰都、涪陵、武隆、长寿、渝北、巴南、江津等 15 个区县(市),幅员面积 4.61 万 km<sup>2</sup>,2005 年末人口 1 841 万,城镇化水平 30.7%(15 区县 19.1%)。三峡库区重庆段属于亚热带季风性湿润气候,地带性植被为常绿阔叶林,森林覆盖率低于 30%,水土流失面积比重 56%。该段地跨川东平行岭谷低山丘陵区、大巴山喀斯特中山区和大娄山、巫山低中山山区,山地占 74%、丘陵占 21%、河谷平坝占 5%。

### 1.2 数据来源

数据源于 1997—2007 年《重庆市统计年鉴》;1997—2007 年《重庆国民经济和社会发展统计公报》。

### 1.3 评价指标的确定及评价方案

1.3.1 评价指标的确定 20 世纪 80 年代末,经济合作和开发组织(OECD)与联合国环境规划署(UNEP)共同提出了环境指标的 P—S—R 概念模型,即压力(pressure)—状态(state)—响应(response)模型。在 P—S—R 框架内,环境问题可以表述为 3 个不同但又相互联系的指标类型:压力指标反映人类活动给环境造成的负荷;状态指标表征环境质量、自然资源与生态系统的状况;响应指标表征人类面临环境问题所采取的对策与措施。

根据压力—状态—响应模型,从这三方面初步确定了一系列指标,运用 SPSS11.5 软件,计算这一系列指标的累计贡献率,选取累计贡献率大于 85%或特征根值大于 1 的因子作为公因子,再在 SPSS 软件求公因子的“旋转因子载荷矩阵”,通过对公因子载荷矩阵实施方差最大正交旋转,确定 20 个指标评价体系(表 1)。

1.3.2 评价标准的确定 由于目前学术界没有统一认可的城市生态系统健康标准。在确定城市生态系统健康标准时,依据国家对健康城市的要求和国家环保局对健康城市建设的标准来确定。以全国最低值为病态的限定值,在前者基础上向下浮动 20%作为健康和亚健康的划分标准值,在后者基础上向上浮动 20%不健康和亚健康的划分标准值,前后两次确定的亚健康标准值相互调整得到最终值<sup>[7-8]</sup>(表 1)。

### 1.4 权重的确定

在确定评价指标的权重时,往往多采用主观确定权重的方法,如 AHP 方法等。它首先是把复杂的问题分解为若干层次,建立层次结构模型,然后由专家对层次模型中各所列指标进行比较,逐层构建矩阵,并对矩阵进行一致性检验,如果通过一致性检验,证明矩阵有效,最后进行层次总排序得到各因素的权重值。其优点是思路简单,层次清晰,对问题涉及的因素及其关系分析得较透彻,能有效地建立指标的权值分布。其缺点可能会由于人的主观因素而形成偏差。

熵权法属于客观赋权法,主要是根据各指标提供的信息量大小来计算综合指标的数学方法。在信息论中,熵值反映了信息无序化程度,其值越小,系统无序值越小,故可用信息熵评价所获系统信息的有序度及有效性,即由评价指标值构成的判断矩阵来确定指标权重。其优点是能客观准确地得到各指标的权重,其缺点可能会由于数据统计以及部分特定历史数据发生的偶然性等原因,导致与实际情况不符。为了使权重更合理,本文将取 AHP 的权值和熵权值的平均值作为综合权重值见表 2。

### 1.5 评价模型

控制论学者艾什比将内部信息缺乏的客体称为“黑箱”,据此,人们常用颜色的深浅表示信息的多少。“黑”指信息缺乏,“白”指信息完全,“灰”则指信息部分已知、部分未知,即信息不完全。对生态安全进行安全度评价时其有些因素是已知的,而有些因素则是未知的,所以采用灰色理论进行生态安全度的评价是合理的<sup>[9]</sup>。

1.5.1 确定生态安全分级标准 通过查阅资料得出各评价因子的值。设生态安全标准共分为 5 级,则有各级生态环境标准参数序列

$$X_i(k) = \{x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)\} \quad i=1, 2, \dots, 5 \quad (1)$$

式中: $x_i(k)$ —— $i$  级生态安全标准中第  $k$  项评价因子的取值。

表 1 城市生态系统健康评价体系及分级标准

指标系统			分级标准				
目标层	准则层	指标层	病态	不健康	亚健康	健康	很健康
生态 安全 评价	压力	每平方公里城市人口密度/万人	0.25	0.2	0.15	0.11	0.08
		人均 GDP(万元/人)	1	3	5	8	12
		人口自然增长率/‰	5	4	3	2	0.8
		第三产业 GDP 比重/%	25	40	55	65	75
	状态	万人拥有车辆数/台	10	16	22	28	32
		万人拥有医生数/人	20	30	40	50	60
		百人拥有电话数/部	60	100	140	180	200
		饮水水源水质达标率/%	50	65	85	95	100
		人均住宅面积/m <sup>2</sup>	10	15	20	25	30
		人均公共绿地面积/m <sup>2</sup>	4	8	12	16	20
		人均拥有道路/m <sup>2</sup>	5	10	15	20	28
		恩格尔系数/%	40	35	30	25	20
		森林覆盖率/%	25	30	35	40	45
		自然保护区占全省面积比例%	8	12	15	20	25
	响应	科教经费占 GDP 比重%	0.5	1	1.5	2	2.5
		环保投资占 GDP 比重%	1	1.8	2.5	3.5	4
		万人拥有学历人数/人	100	300	600	900	1200
		万人拥有各级各类学校数/个	5.6	9.8	15.7	21.2	27.8
		工业废水达标排放率/%	70	75	85	95	100
		工业固废综合利用率/%	60	70	80	90	100

表 2 三峡库区重庆段生态安全评价指标权重(以 1997 年为例)

指标层	AHP 法权重	熵值法权重	综合权重 $w_k$	指标层	AHP 法权重	熵值法权重	综合权重 $w_k$
C1	0.0548	0.0506	0.0527	C11	0.0397	0.0502	0.0450
C2	0.0615	0.0503	0.0559	C12	0.0417	0.0485	0.0451
C3	0.0289	0.0487	0.0388	C13	0.0360	0.0499	0.0430
C4	0.0763	0.0499	0.0631	C14	0.0335	0.0508	0.0422
C5	0.0633	0.0507	0.0570	C15	0.0359	0.0505	0.0432
C6	0.0903	0.0497	0.0700	C16	0.0499	0.0502	0.0501
C7	0.0360	0.0506	0.0433	C17	0.0537	0.0484	0.0511
C8	0.0633	0.0490	0.0562	C18	0.0560	0.0502	0.0531
C9	0.0648	0.0490	0.0569	C19	0.0642	0.0496	0.0569
C10	0.0258	0.0528	0.039	C20	0.0244	0.0504	0.0374

设待评生态环境共有 20 个样本,则待评生态环境的参数序列为

$$Y_j(k)=\{y_j(1),y_j(2),\cdots,y_j(n)\} \quad j=1,2,\cdots,20$$

(2)

式中: $y_j(k)$ ——第  $j$  个生态环境中第  $k$  项评价因子的实测值。

1.5.2 归一化处理

$$x'_i(k)=\frac{x_i(k)}{A}$$

(3)

$$y'_j(k)=\frac{y_j(k)}{B}$$

(4)

对于不同的评价因子参数列,上式中的 A、B 值可以改变。归一化处理后,求生态安全参数和各级标准序列的关联度。

1.5.3 求差序列

$$\Delta 1i(k)=|y'_j(k)-x'_i(k)|$$

(5)

1.5.4 求两级最大差和两级最小差

$$\Delta \max=\max_i\max_k|y'_i(k)-x'_i(k)|$$

(6)

$$\Delta \min=\min_i\min_k|y'_i(k)-x'_i(k)|$$

(7)

1.5.5 求关联系数

$$\xi 1i(k)=\frac{\Delta \min+0.5\times\Delta \max}{\Delta 1i(k)+0.5\times\Delta \max}$$

(8)

1.5.6 求关联度(评价模型)

$$R1i=\sum_{k=1}^n w_k \xi 1i(k)$$

(9)

式中: $w_k$ ——综合权重值(由熵权和 AHP 求出的平均值)。

求出第一个年份的各级安全的关联度后,就在 m

个关联度中找最大者,即可确定第一个年份所属的安全等级。重复 2.5.1~2.5.6 的步骤,即可求得其他年份所属的生态安全等级。最后可获得需要的所有年份的生态安全等级。

2 实例研究

2.1 求差并归一化处理(以 1997 年为例)得:

$$\Delta Ii(k)=\begin{bmatrix} 0.215 & 0.165 & 0.115 & 0.075 & 0.045 \\ 0.008 & 0.028 & 0.048 & 0.078 & 0.118 \\ 0.029 & 0.129 & 0.229 & 0.329 & 0.449 \\ 0.067 & 0.083 & 0.233 & 0.333 & 0.433 \\ 0.070 & 0.130 & 0.190 & 0.250 & 0.290 \\ 0.108 & 0.008 & 0.092 & 0.192 & 0.292 \\ 0.038 & 0.078 & 0.118 & 0.158 & 0.178 \\ 0.401 & 0.251 & 0.051 & 0.049 & 0.099 \\ 0.164 & 0.114 & 0.064 & 0.014 & 0.036 \\ 0.020 & 0.060 & 0.100 & 0.140 & 0.180 \\ 0.000 & 0.050 & 0.100 & 0.150 & 0.230 \\ 0.067 & 0.117 & 0.167 & 0.217 & 0.267 \\ 0.036 & 0.014 & 0.064 & 0.114 & 0.164 \\ 0.248 & 0.408 & 0.528 & 0.728 & 0.928 \\ 0.037 & 0.087 & 0.137 & 0.187 & 0.237 \\ 0.008 & 0.088 & 0.158 & 0.258 & 0.308 \\ 0.151 & 0.131 & 0.101 & 0.071 & 0.041 \\ 0.012 & 0.054 & 0.113 & 0.168 & 0.234 \\ 0.102 & 0.052 & 0.048 & 0.148 & 0.198 \\ 0.057 & 0.157 & 0.257 & 0.357 & 0.457 \end{bmatrix}$$

2.2 求得两级最大差和两级最小差

$$\Delta \max = \max_i \max_k |y'_i(k) - x'_i(k)| = 0.928$$
$$\Delta \min = \min_i \min_k |y'_i(k) - x'_i(k)| = 0$$

2.3 根据式(8)求得关联系数矩阵

$$[\xi Ii(k)] = \begin{bmatrix} 0.683 & 0.738 & 0.801 & 0.861 & 0.912 \\ 0.984 & 0.944 & 0.907 & 0.857 & 0.798 \\ 0.941 & 0.782 & 0.670 & 0.585 & 0.508 \\ 0.874 & 0.848 & 0.666 & 0.582 & 0.517 \\ 0.869 & 0.781 & 0.710 & 0.650 & 0.615 \\ 0.811 & 0.983 & 0.834 & 0.707 & 0.614 \\ 0.924 & 0.856 & 0.797 & 0.746 & 0.723 \\ 0.536 & 0.649 & 0.901 & 0.905 & 0.824 \\ 0.739 & 0.803 & 0.879 & 0.971 & 0.928 \\ 0.959 & 0.886 & 0.823 & 0.768 & 0.721 \\ 1.000 & 0.903 & 0.823 & 0.756 & 0.669 \\ 0.874 & 0.799 & 0.735 & 0.681 & 0.635 \\ 0.928 & 0.971 & 0.879 & 0.803 & 0.739 \\ 0.652 & 0.532 & 0.468 & 0.389 & 0.333 \\ 0.926 & 0.842 & 0.772 & 0.713 & 0.662 \\ 0.983 & 0.841 & 0.746 & 0.643 & 0.601 \\ 0.755 & 0.780 & 0.822 & 0.868 & 0.920 \\ 0.974 & 0.895 & 0.804 & 0.734 & 0.664 \\ 0.820 & 0.899 & 0.906 & 0.758 & 0.701 \\ 0.890 & 0.747 & 0.643 & 0.565 & 0.504 \end{bmatrix}$$

2.4 关联度

据式  $r_{1i} = \sum_{k=1}^n w_k \xi_{1i}(k)$  求得关联度

$R_{1i} = \{r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{14}\}$

$= \{0.8499, 0.8285, 0.7857, 0.7338, 0.6858\}$

2.5 最大关联度

$r_{\max} = \max_i \{r_{1i}\} = r_{11} = 0.8499$

定量计算表明:三峡库区重庆段生态安全属于第一级即病态。从样本值来看,参评的参数大部分处于

病态或不健康状态,故将三峡库区重庆段生态安全定为第一级(病态)是合适的。同理可得三峡库区其他各年的生态安全状态,详见表 3。

表 3 三峡库区重庆段从 1997—2007 年生态安全状态

类别 年份	关联度					安全 等级
	病态	不健康	亚健康	健康	很健康	
1997	0.8499*	0.8285	0.7857	0.7338	0.6868	病态
1998	0.8527*	0.8477	0.7931	0.7433	0.6936	病态
1999	0.8387	0.8471*	0.8085	0.7541	0.7014	不健康
2000	0.8182	0.8270*	0.7779	0.7167	0.6589	不健康
2001	0.7779	0.7916*	0.7394	0.7024	0.6743	不健康
2002	0.7778	0.8046*	0.7429	0.6918	0.6315	不健康
2003	0.7765	0.8088*	0.7364	0.6866	0.6331	不健康
2004	0.7765	0.8088*	0.7364	0.6866	0.6331	不健康
2005	0.7558	0.7996*	0.7381	0.7018	0.6525	不健康
2006	0.7570	0.8180*	0.7646	0.7257	0.6790	不健康
2007	0.7790	0.8282*	0.8005	0.7610	0.7209	不健康

注 \* 表示的数字指的最大关联度值。

同理,按压力—状态—响应模型,评价其生态安全。见表 4

3 结论

(1)运用灰色关联度求出 1997 年和 1998 年三峡库区重庆段生态安全评价为病态,原因是三峡库区生态安全评价的 20 个指标中,三峡库区的人均 GDP、第三产业 GDP 比重、万人车辆数、万人医生数、万人电话数、人均住宅面积、人均公共绿地面积、人均道路、科教经费 GDP、环保 GDP、万人拥有学历人数、万人拥有的学校数等大多数指标均在病态范围内,只有人均密度、人口自然增长率、饮水水源水质达标率、工业废水达标排放率等几个指标处于健康状况。

(2)从 1999—2007 年用灰色关联度评价三峡库区重庆段生态安全为不健康,较 1997 年和 1998 年以前有所好转,原因是在这 20 个指标中,各项指标都有不同程度的改善。

(3)在压力—状态—响应概念框架模型的指导下,将灰色关联法运用到三峡库区重庆段生态安全评价具有一定的可行性。从资源环境压力来看,1997 年处于病态,1998—2007 年都为不健康;从资源环境状态来看,1997 年处于不健康,1998—2000 年处于病态,2001—2007 年处于不健康状况;从人文环境响应来看,1997—2003 年均处于病态,2004 年处于不健康状况,2005—2007 年处于亚健康状况。通过运用灰色关联法分析重庆直辖以来的三峡库区段生态安全状态变化,为政府了解库区状况,有针对性地加大环保投入,制定相应的方针政策提供一定的科学依据。

表 4 基于压力—状态—响应模型的生态安全状态

年份	项目	病态	不健康	亚健康	健康	很健康	安全等级
1997	生态安全	0.8499*	0.8285	0.7857	0.7338	0.6868	病态
	压力	0.1827*	0.1755	0.1609	0.1527	0.1450	病态
	状态	0.4077	0.4079*	0.3938	0.3705	0.3411	不健康
	响应	0.2595	0.245	0.231	0.2106	0.1997	病态
1998	生态安全	0.8527*	0.8477	0.7931	0.7433	0.6936	病态
	压力	0.1795	0.183*	0.1661	0.1567	0.1481	不健康
	状态	0.4111*	0.4091	0.3922	0.3732	0.3436	病态
	响应	0.2621*	0.2555	0.2347	0.2134	0.2019	病态
1999	生态安全	0.8387	0.8471*	0.8085	0.7541	0.7014	不健康
	压力	0.1702	0.1843*	0.175	0.1627	0.1521	不健康
	状态	0.4119*	0.4107	0.3941	0.3756	0.346	病态
	响应	0.2565*	0.2521	0.2394	0.2158	0.2034	病态
2000	生态安全	0.8182	0.8270*	0.7779	0.7167	0.6589	不健康
	压力	0.1633	0.1824*	0.1677	0.1542	0.1432	不健康
	状态	0.4132*	0.4057	0.3832	0.3618	0.3285	病态
	响应	0.2416*	0.2390	0.227	0.2008	0.1873	病态
2001	生态安全	0.7779	0.7916*	0.7394	0.7024	0.6743	不健康
	压力	0.1506	0.171*	0.1603	0.1549	0.1466	不健康
	状态	0.3964	0.4016*	0.3701	0.3502	0.3346	不健康
	响应	0.2309*	0.219	0.209	0.1973	0.1930	病态
2002	生态安全	0.7778	0.8046*	0.7429	0.6918	0.6315	不健康
	压力	0.1539	0.1779*	0.1614	0.1465	0.1351	不健康
	状态	0.3969	0.4038*	0.3694	0.3502	0.3166	不健康
	响应	0.227*	0.2228	0.2121	0.1951	0.1798	病态
2003	生态安全	0.7765	0.8088*	0.7364	0.6866	0.6331	不健康
	压力	0.1561	0.1826*	0.1574	0.1439	0.1334	不健康
	状态	0.3949	0.4015*	0.3661	0.3458	0.3186	不健康
	响应	0.2255*	0.2247	0.213	0.1969	0.1811	病态
2004	生态安全	0.7765	0.8088*	0.7364	0.6866	0.6331	不健康
	压力	0.1546	0.1731*	0.1607	0.1455	0.1341	不健康
	状态	0.3981	0.4041*	0.3673	0.3457	0.3213	不健康
	响应	0.2227	0.2348*	0.2196	0.2096	0.1907	不健康
2005	生态安全	0.7558	0.7996*	0.7381	0.7018	0.6525	不健康
	压力	0.1628	0.1698*	0.1462	0.1358	0.1273	不健康
	状态	0.3906	0.4082*	0.3675	0.3437	0.3216	不健康
	响应	0.2024	0.2216	0.2244*	0.2224	0.2036	亚健康
2006	生态安全	0.7570	0.8180*	0.7646	0.7257	0.6790	不健康
	压力	0.1549	0.1698*	0.1474	0.1378	0.1299	不健康
	状态	0.3943	0.4224*	0.3852	0.3583	0.3383	不健康
	响应	0.2078	0.2258	0.2320*	0.2296	0.2108	亚健康
2007	生态安全	0.7790	0.8282*	0.8005	0.7610	0.7209	不健康
	压力	0.1582	0.1652*	0.1497	0.1422	0.1354	不健康
	状态	0.4065	0.4330*	0.4032	0.3782	0.3602	不健康
	响应	0.2143	0.2300	0.2477*	0.2406	0.2253	亚健康

注 \* 表示的数字指的最大关联度值。

参考文献：

[1] Costanza R, Norton B G, Haskell B D. Ecosystem Health: New Goals for Environmental Management [M]. Washington DC: Island Press, 1992: 1-125.

[2] Dobson Andy P. Hopes for the future: Restoration ecology and conservation ecology[J]. Science, 1997, 277: 515-524.

(下转第 133 页)

别为 240,280,180 cm。黑沙蒿和沙木蓼的根系主要集中在 0—80 cm,占到总根系的 70%左右,杨柴的根系在 120 cm 深度以上占总根量的 35%左右,相比之下杨柴的根系分布更深更广。

(3)各层根系生物量垂直分布与其对应土壤含水率有明显对应关系,土壤含水率的变化与根系生物量的变化趋于相反。杨柴的土壤水分含量变化范围为 0.80%~6.33%,黑沙蒿的为 2.37%~6.48%,沙木蓼为 1.11%~3.88%。总体来看土壤含水量为黑沙蒿>沙木蓼>杨柴。植被与土壤含水率的这种关系是由于根系对土壤水分吸收所形成的,是对干旱环境的响应。植物根系分布特点决定植物的水分利用策略,植物对水分亏缺的生理响应与植物水分利用策略密切相关,并且和根系功能型一起决定着植物对限制其生存的环境因子的响应与适应特性。已有研究表明不同植物功能型(如生活型)可以从不同的土壤层获取水分(利用不同的水分来源),表现出对水资源分割特性<sup>[8-11]</sup>

(4)在沙地中水分是制约生物生长的主要因子,3 种灌木虽然都能在较低的土壤水分含量的沙地中生长,都是较好的固沙树种,但是面对生境的剧烈变化,比较理想的情况是植物根系分布较深,主要利用深层土壤水分。杨柴根系分布较深且以粗根为主,能够利用深层的土壤水分,表层水分变化对其影响较小,杨柴的根系生物量大,水平分布范围也较广,既可利用表层中的水分,又可利用深层中的水分,深根与浅根的不同分布格局,在空间上合理的解决了对水分需求的矛盾。可以作为一个较为理想的固沙造林先锋灌木种。黑沙蒿根系虽然分布较深,但根系呈明显的轴根性,根系大部分集中在表层,且细根所占比重较大,主要利用土壤表层储水,对表层的土壤水分含量响应比较大,所以黑沙蒿适合生长在表层水分含量相对较高的丘间低地。沙木蓼的根系生物量虽然要大于黑沙蒿,但垂直分布深度较浅,对浅层地下水几乎不能利用,对表层的土壤水分含量响应更大,所以沙木蓼应该更适合在丘间低地生长,但沙木蓼生长迅速,枝

条又是良好的编织材料,应该充分利用其优势之处。植物根系生长发育动态及形态特征是由生物学特性和环境因素共同作用的结果。

#### 参考文献:

- [1] 郭柯,董学军,刘志茂. 毛乌素沙地沙丘土壤含水量特点:兼论老固定沙地上油蒿衰退原因[J]. 植物生态学报,2000,24(3):275-279.
- [2] 刘秀萍,陈丽华,陈吉虎. 刺槐和油松根系密度分布特征研究[J]. 干旱区研究,2007,23(5):647-651.
- [3] 牛海,李和平,赵萌莉. 毛乌素沙地不同水分梯度根系垂直分布与土壤水分关系的研究[J]. 干旱区资源与环境,2008,22(2):157-163.
- [4] 阿拉木萨,蒋德明,裴铁璠. 沙地人工小叶锦鸡儿植被根系分布与土壤水分关系研究[J]. 水土保持学报,2003,20(3):78-81.
- [5] 王鸣远,关三和,王义. 毛乌素沙地过渡地带土壤水分特征及其植物利用[J]. 干旱区资源与环境,2002(2):37-44.
- [6] 祝廷成. 羊草生物生态学[M]. 长春:吉林科学技术出版社,2004.
- [7] 苏芳莉,刘明国,郭长久. 沙地樟子松根系垂直分布特征及对土壤的影响[J]. 中国水土保持,2006,20(1):157-163.
- [8] Xu H, Li Y. Water-use strategy of three central Asian desert shrubs and their responses to rain pulse events [J]. Plant and Soil, 2006,285:5-17.
- [9] Xu H, Li Y, Xu G Q, et al. Ecophysiological response and morphological adjustment of two Central Asian desert shrubs towards variation in summer precipitation plant[J]. Cell and Environment,2007,30:399-409.
- [10] Cohen Y, Fuchs M, Cohen S. Resistance to water uptake in mature citrus tree[J]. Journal of Experimental Botany, 1983,34:451-560.
- [11] Schwinning S, Ehleringer J R. Water use trade-off and optimal adaptations to pulse-driven arid ecosystem[J]. Journal of Ecology,2001,89:464-480.
- [12] Fogel R. Root turnover and productivity of coniferous forests[J]. Plant and Soil,1983,71:75-85.

(上接第 128 页)

- [3] 肖荣波,欧阳志云,韩艺师,等. 海南岛生态安全评价[J]. 自然资源学报,2004,19(6):769-775.
- [4] 吴开亚,张礼兵,金菊良,等. 基于属性识别模型的巢湖流域生态安全评价[J]. 生态学杂志,2007,26(5):759-764.
- [5] 张凤太,苏维词,周继霞. 基于熵权灰色关联分析的城市生态安全评价[J]. 生态学杂志,2008,27(7):1249-1254.

- [6] 左伟,王桥,王文杰,等. 区域生态安全评价指标与标准研究[J]. 地理学与国土研究,2002,18(1):67-71.
- [7] 曾勇,沈根祥,黄沈发,等. 上海城市生态系统健康评价[J]. 长江资源流域与环境,2005,14(2),208-212.
- [8] 官冬杰,苏维词. 城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J]. 环境科学学报,2006,26(10):1716-1721.
- [9] 赵云胜,龙昱,赵钦球,等. 灰色系统理论在地学中的应用研究[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1997:29-31.