

# 用灰色关联度法评价森林涵养水源生态效益<sup>\*</sup>

## ——以辽东山区主要森林类型为例

张德成<sup>1</sup>, 殷鸣放<sup>2</sup>, 魏进华<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院科信所, 北京 100091; 2. 沈阳农业大学 林学院, 沈阳 110161; 3. 北华大学 林学院, 吉林 132013)

**摘 要:** 阐述了用灰色关联度法评价森林涵养水源生态效益的理由和步骤, 以辽东山区主要森林类型的评价为例, 选取的指标包括: 平均树冠截留量、枯落物含水量、土壤非毛管孔隙最大含水量、蒸发散量、渗透速率, 根据关联度大小, 对各森林类型的涵养水源生态效益和各个指标重要程度进行对比, 在辽东山区的森林中, 落叶松中龄林的涵养水源生态效益最佳, 其次为杂木林、红松中龄林、红松幼龄林、落叶松幼龄林和柞树林, 各项指标的重要程度由大至小依次为土壤非毛管孔隙最大含水量、蒸发散量、平均树冠截留量、枯落物含水量和土壤渗透速率。

**关键词:** 涵养水源; 森林水文学; 灰色关联度; 评价; 辽东山区

中图分类号: S715. 4                      文献标识码: A                      文章编号: 1005-3409(2007) 04-0096-04

# Benefits Estimating of Forest Ecosystem Water-Feeding with Gray Correlation Method in Liaoning Province Eastern Mountainous area

ZHANG De-cheng<sup>1</sup>, YIN Ming-fang<sup>2</sup>, WEI Jin-hua<sup>3</sup>

(1. China Forestry Science Research Academy, Beijing 100091, China;  
2. Forestry College of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;  
3. Forestry College of Beihua University, Jilin 132013, China)

**Abstract:** The reason and process of estimating water-feeding benefits of forest ecosystem were expatiated with the gray correlation method. The case is mostly important forest style in Liaoning province eastern mountainous area. The indexes include canopy interception, water absorption capacity of the litter, water absorption capacity of soil, forest evaporation and transpiration, infiltration velocity. The results indicated that half mature larch have best water feeding benefit among some forest style, and later is weed tree, half-mature Korean pine, young growth Korean pines, young growth larch and the last is oak. The turn of factors from high importance to low is water absorption capacity of soil, evaporation and transpiration, canopy interception, litter's water absorption, infiltration velocity.

**Key words:** water-feeding; forest hydrology; gray correlation; estimating, Liaoning province eastern mountainous area

对森林涵养水源生态效益进行评价对于水源涵养林的培育具有重要作用, 森林涵养水源生态效益存在多目标性, 具有动态变化的特点, 一般采用多因子综合评价。姜文来(2002)运用模糊数学的方法评价<sup>[7]</sup>, 选取多项指标, 用打分的方法赋予权重, 这种方法存在较大的人为因素; 程根伟(2004)提出了森

林水文效应定量评价体系<sup>[3]</sup>, 包括: 森林状态特征指标、小气候评价指标、枯季径流指标、拦蓄暴雨径流指标、自流洪水指标。这个指标体系选取的指标很多, 在实际工作中外业和内业工作量都很大。本文采用多因子综合的方法评价, 在对指标甄选的基础上探索用更简便的方法——灰色关联度分析来评价

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-03-30  
作者简介: 张德成(1973-), 男, 辽宁沈阳人, 博士生, 助理研究员, 专业为森林培育。

森林涵养水源的生态效益,并以辽东山区主要森林类型的涵养水源生态效益评价为例说明。

## 1 灰色关联度概述

### 1.1 灰色关联度的数学原理

任何一个系统都具有许多因素,因素之间通过协调与抑制、促进与补充、协调与排斥构成了系统的行为,那么影响系统行为的各个因素形成主次,不同系统间的对比更表现出复杂性,灰色关联度分析是根据系统各个因素间或系统行为间的数据列或指标列的发展态势与行为作相似或相异程度的比较,以判断因素的关联度和行为的接近。

灰色关联度是一种多因素统计分析方法<sup>[9]</sup>,它以各因素的样本数据为依据,用灰色关联度来描述因素间关系的强弱、大小和次序,其基本思想是根据曲线几何形状的相似程度来判断关联度程度。该方法定量考虑多个因子的作用,得出具有可比性的综合性指标,从而提高综合评估的准确性和有效性,避免了人为评判的主观性。

### 1.2 灰色关联度法的数学过程

设参考时间序列  $X_0 = \{x_0(t_1), x_0(t_2), x_0(t_3), \dots, x_0(t_n)\}$  比较时间序列为  $X_j = \{x_j(t_1), x_j(t_2), x_j(t_3), \dots, x_j(t_n)\}$  则在  $x_0$  与  $x_j$  在  $t_k$  时刻的关联度系数表示为:

$$x_{0j}(t_k) = \frac{\Delta_{\min} + \xi \Delta_{\max}}{\Delta_{0j}(t_k) + \xi \Delta_{\max}}$$

式中:  $\xi \in [0, 1]$  ——分辨系数,是一个事先取定的常数。

$$\Delta_{\min} = \min_j \max_k |x_0(t_k) - x_j(t_k)| \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Delta_{\max} = \max_j \max_k |x_0(t_k) - x_j(t_k)| \quad k = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$\Delta_{0j}(t_k) = |x_0(t_k) - x_j(t_k)|$$

关联度系数的时间平均值为: 
$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{0j}(t_k)$$

称为  $X_j$  对  $X_0$  的关联度,若  $r_i > r_j > r_k$ , 则  $X_i, X_j, X_k$  对  $X_0$  的关联度大小顺序依次为  $X_i, X_j, X_k$ 。

## 2 理由与步骤

### 2.1 森林涵养水源生态效益的特点

森林具有拦洪和枯期灌溉的作用,影响森林生态系统涵养水源生态效益的因素众多,具有极大的时间变异性和空间异质性<sup>[1,5]</sup>:(1)森林涵养水源的生态效益的多变量性。包括了降水截留、增雨指标、下渗与渗透指标、蒸发散指标、土壤水分指标、径流指标、水质指标等。(2)森林涵养水源的生态效益的生态评价的多目标性<sup>[14]</sup>,包括森林状态特征指标、

小气候评价指标、枯季供水指标、拦蓄暴雨径流指标等,现在还没有一个评价模型能够将上述指标都涵盖,原因是这些指标的单位不一致,且指标值在空间上和时间上呈现动态变化。(3)各个林种的指标值存在一定差异<sup>[15]</sup>,一方面对同一指标而言,林种之间存在高低之分,另一方面,对于林种而言,其评价指标也不一样,如某林种在一项指标值高于另一林种,而在另一项指标可能低于另一林种。

### 2.2 灰色关联度法评价森林涵养水源效益的理由

为了分析各个林种之间涵养水源生态效益的高低,采用灰色系统理论中的关联度分析方法是基于如下原因:

(1)森林涵养水源功能的发挥过程是一个难以全面采集信息的灰色系统。在这个系统中,功能是明确的,森林涵养水源的功能是确信无疑,功能产生的原因也是明确的,即由于森林的存在,评价指标容易获得,但指标与功能之间的过程却不很明确,表现出复杂的特点,森林对水分的分配复杂多样,涵养水源功能具有空间和时间的差异,对于这一过程,用现有的方法难以全部测定和描述<sup>[11]</sup>,表现出灰色系统的特征。

(2)在评价森林涵养水源生态效益时,可以用显性指标来评价灰色系统的功能。显性指标指可以得到详尽数据的森林水文生态指标,我们可以假定,森林涵养水源功能就是由这些指标全部或部分决定,是一定树木和林地生态功能共同作用的结果,在结果难以评价的时候,可以用评价原因的方法来评价结果,对森林相关的水文生态特征的评价在一定程度上可以代表涵养水源生态效益的评价。

(3)灰色关联度法具有较强的客观性。在针对一个地区的森林涵养水源评价时,对该地区的森林类型进行较全面的调查,参考林种具有代表该地区最佳涵养水源生态效益的意义,各项指标与系统功能呈正相关,用各森林类型或指标与灰色系统矩阵的关联度来评价其涵养水源效益,尽量避免了主观因素,具有一定的现实性和客观性。

### 2.3 应用步骤

选取森林涵养水源功能的指标包括:  $X_1$ : 平均树冠截留量(mm)、 $X_2$ : 枯落物含水量(mm)、 $X_3$ : 土壤非毛管孔隙最大含水量( $\text{g}/\text{cm}^3$ )、 $X_4$ : 蒸发散量(mm)、 $X_5$ : 渗透速率(mm),其中蓄水功能与  $X_2, X_3$  正相关,削洪功能与  $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$  呈正相关。以上指标与森林涵养水源生态功能的发挥具有一定的相关性<sup>[6,8]</sup>。这些不同指标对评价森林涵养水源功能具有较大的影响。

第一步, 以下列指标为横列变量, 以各个林种为纵列变量构造评价矩阵。

第二步, 构造“参考林种”, 所谓“参考林种”就是各性状达到涵养水源生态效益最优状态的理想林分, 依靠经验定性分析确定, 一般取比供试林种各性状之上限值略大一点的数值, 以其各项性能指标所构成的数列作为参考数列, 以供试林种的各项性能指标所构成的数列为比较数列。

第三步, 对数据进行整理无量纲化, 各个参试林种的指标值除以参考林种的指标值得到比值矩阵。

第四步, 计算两级最小差与最大差, 求关联度系数和各供试林种与参考林种之间的关联度和各个指标之间的关联度。

第五步, 在各性状等权情况下, 根据关联度大小, 对参试林种的涵养水源生态效益进行对比, 对各个指标对森林涵养水源生态效益的重要程度进行评价和对比。

3 以辽东山区主要森林类型为例

3.1 研究区域和试验地概况

辽宁省东部山区系长白山脉西南部的延伸, 属

于温带湿润的季风气候, 年降水量 750~ 1 200 mm。年均气温 5~ 8 ℃, 土壤类型多属棕色森林土和暗棕色森林土, 也有少部分黑土和灰化土, 现有森林面积  $2.213 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 森林覆盖约为 45%, 地带性植物群落是以红松为主的针阔混交林。

试验地位于后楼水库集水区内辽宁省试验林场和清原县湾甸子镇林业站所属林区, 属中温带大陆性季风气候, 年平均气温 5.3 ℃, 雨热同期, 年均降雨 806.5 mm。多集中在 6, 7, 8 月份。土壤为中、厚层酸性岩暗棕壤土, 下部林缘部分多为棕壤, 混有砾石, 沟谷为草甸土。从气候、土壤及植被的特点来看该地区在辽东山区具有一定的代表性。

为了使研究结果具有可比性, 这里选择树龄基本一致、土壤类型相同、立地条件相近的在辽东山区具有代表性的几种森林类型(龄组)进行比较分析。包括: 落叶松幼龄林、落叶松中龄林、红松幼龄林、红松中龄林、柞树林、杂木林。根据辽宁省试验林场小班调查资料, 取各龄级林分的诸项指标平均值, 分别在各林分类型中选取固定标准地 3 块, 对标准地的自然环境和生物因子进行调查, 标准地情况见表 1。

表 1 固定标准地概况

林分类型及龄级	坡向	坡度 /°	坡位	年龄 /a	郁闭 度	标准地株树 /株	平均胸径 /cm	平均高 /m	平均冠幅 /m <sup>2</sup>	枯落物量 /(t·hm <sup>-2</sup> )
落叶松幼龄林(Ⅳ)	N	10	下	15	0.9	102	11.2	7.2	9.2	20.49
落叶松中龄林(Ⅴ)	W	16	中	42	0.9	32	23	18.5	16.8	83.87
红松幼龄林(Ⅳ)	W	25	中	26	0.9	57	13.5	8.5	12.4	20.30
红松中龄林(Ⅴ)	W	18	中	50	0.85	28	25.5	17.6	18	23.76
柞树林(Ⅵ)	W	20	中上	异龄	0.8	23	18	12.4	20.6	20.22
杂木林(Ⅶ)	W	15	中	异龄	0.8	40	15	11.3	12.1	20.85

3.2 试验材料和方法

3.2.1 平均树冠截留量的测定

本次试验的时间是 2005 年 5~ 10 月, 在林外空旷地设置 3 个雨量桶, 测定林外雨; 在落叶松幼龄林、落叶松中龄林、红松幼龄林、红松中龄林、柞树林、杂木林分别建立 20 m × 30 m 的标准样地 3 块, 每块选 3 株标准木, 在标准木下侧约 0.6 倍投影半径的位置上各放置一个雨量桶, 测定林内雨; 每标准地选 3 株标准木, 用套管法测树干径流。以上指标是在每次降雨后迅速测定, 实际降雨量减去林内雨再减去树干径流即为树冠截留量。

3.2.2 枯落物持水能力的测定

在每标准地林下设 3 个 1 m × 1 m 的样方, 用

封闭严的塑料袋收集枯落物, 利用水浸法和烘干法测枯落物最大持水量, 根据面积比推算整个标准地枯落物的持水能力<sup>[12]</sup>。

3.2.3 土壤非毛管孔隙最大含水量和渗透速率的测定

在不同林分标准地挖土壤剖面各 3 个, 用 100 cm<sup>3</sup> 环刀进行在土壤层次为 0~ 15 cm, 15~ 30 cm, 30~ 45 cm, 45 cm 以下分层土壤取样, 测非毛管孔隙度, 用环刀渗透法测定土壤渗透速率<sup>[10]</sup>。

3.2.4 蒸发散量测定

用 5 cm 环刀在每块标准地的标准木下侧约 0.6 倍投影半径的位置上挖土壤剖面, 向下垂直不间断取样 6 个, 分别测定重量后, 迅速用塑料胶带将环刀

按照土层顺序连在一起,再埋置于原处,24 h 后称重,测蒸发量,每块标准地做 3 次重复;在每一林分中选取标准木 3 株,采用“快速称重法”测定蒸腾强度;测量时间在 7 月,蒸发量与蒸腾量的和即是蒸发散量<sup>[4, 13]</sup>,运用尼里德尔模型推算各个月份的日平均蒸发散量<sup>[2]</sup>,取其均值,得到每公顷林地的日平均蒸发散量。

3.3 结果与分析

测定辽东山区主要森林类型的如下指标:  $X_1$ : 枯落物含水量(mm)、 $X_2$ : 平均树冠截留量(mm)、 $X_3$ : 非毛管孔隙度(mm)、 $X_4$ : 蒸腾量(mm)、 $X_5$ : 渗透速率(mm)的值见表 2。

表 2 各因素数据表					
植被类型	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
0	250	70	0.65	900	2.5
iv	145	19.9	0.545	720	1.95
㊦	246	65.9	0.575	751	1.65
㊧	148	26.2	0.576	762	2.92
㊨	215	23.2	0.504	826	1.49
㊩	156	28.8	0.497	677	1.19
v	183	33.4	0.642	741	0.85

将数据进行标准化处理,其方式是用各林分数据除以参照样本数据,得到标准化数据见表 3。

表 3 标准化数据					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
iv	0.58	0.28	0.84	0.80	0.78
㊦	0.98	0.94	0.88	0.83	0.66
㊧	0.59	0.37	0.89	0.85	1.17
㊨	0.86	0.33	0.78	0.92	0.60
㊩	0.62	0.41	0.76	0.75	0.48
v	0.73	0.48	0.99	0.82	0.34

经过差值运算,得到  $C$  值见表 4。

表 4 差值数据 $C$					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
iv	0.42	0.72	0.16	0.20	0.22
㊦	0.02	0.06	0.12	0.17	0.34
㊧	0.41	0.63	0.11	0.15	0.17
㊨	0.14	0.67	0.22	0.08	0.40
㊩	0.38	0.59	0.24	0.25	0.52
v	0.27	0.52	0.01	0.18	0.66

根据灰色分析运算式计算出关联度系数见

表 5。

表 5 关联度系数表					
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
0	1	1	1	1	1
iv	0.46	0.41	0.69	0.66	0.27
㊦	0.96	0.90	0.60	0.51	0.03
㊧	0.47	0.44	0.73	0.67	0.24
㊨	0.72	0.43	0.60	0.80	0.09
㊩	0.49	0.46	0.56	0.54	0.19
v	0.57	0.49	0.96	0.65	0.01

运用等权方法计算各林分和各因素的灰色关联度,见表 6 和表 7。

表 6 各植被类型的灰色关联度						
植被类型	iv	㊦	㊧	㊨	㊩	v
灰色关联度	0.50	0.60	0.51	0.53	0.45	0.54

从表 6 中可知,落叶松中龄林的涵养水源生态效益最佳,其次为杂木林、红松中龄林、红松幼龄林、落叶松幼龄林和柞树林。

表 7 各因素的灰色关联度					
因素	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
灰色关联度	0.57	0.49	0.68	0.68	0.12

从表 7 中可以知道,对于辽东山区的森林,与涵养水源功能发挥呈正相关关系,由大至小依次为土壤非毛管孔隙最大含水量、蒸发散量、平均树冠截留量、枯落物含水量和土壤的渗透速率。

4 结论和讨论

灰色关联度分析法原理明确,思路清晰,简单易用,在评价森林涵养水源生态功能时表现出较强的科学性和适用性,在对辽东山区的主要森林类型涵养水源生态功能的对比中,应用灰色关联度分析法的结果为落叶松中龄林的效益最佳,其次为杂木林、红松中龄林、红松幼龄林、落叶松幼龄林和柞树林。在影响辽东山区森林涵养水源功能发挥的指标中,相关性由大至小依次为土壤非毛管孔隙最大含水量、蒸发散量、平均树冠截留量、枯落物含水量和土壤渗透速率。

灰色关联度分析法在理想林分的确定上还存在一定的人为因素,且参考林分指标值的赋予对结果有较大的影响,合理地赋值需要对所研究区域中的各个森林类型的情况进行较全面地调查。在参考树种指标合理赋值的情况下,也可以用灰色关联度分析法评价不同地区各森林类型的涵养水源生态效

水势的变化必然受两者的影响与控制<sup>[11]</sup>。从日变化来看,植物水势与土壤含水量、大气水势都成正相关,从 SPAC 系统水势的月变化来看,叶水势幅度明显大于土壤水势,但远不及大气水势。这是由于植物体内水分状况受根系吸水和叶片蒸腾失水双重因素的影响,加之大气水势是绝对气温与相对湿度的一个综合指标,其稳定性及影响因素较多,所以叶片水势与土壤水势的相关性较叶片水势与大气水势的相关性更强。

参考文献:

[1] 高娃,李瑞,郭晓红.白刺-固沙造林的好树种[J].内蒙古农业,2004,10:31-32.

[2] 赵萍.宁夏毛乌素沙地 SPAC 系统中水分运移特征的研究[D].北京:北京林业大学,2004.

[3] 赵立新,等.陕西渭北旱塬土壤-植物-大气连续体中水分运转规律的研究[J].西北植物学报,1996,16(6):1-7.

[4] 龙华.植物的水势[J].生物学通报,1998,33(3):18-19.

[5] 卜崇峰.陕北黄土区狼牙刺水势研究[J].西北植物学报,2003,23(8):1393-1397.

[6] 康绍忠,刘晓明,等.土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M].北京:水利电力出版社,1994.51-60.

[7] Philip J R. Plant water relations:some physical aspects [J]. Ann. Rev. Plant Physiol., 1966, 17: 245-268.

[8] Pelaez D V, Boo R M. Plant water potential for shrubs in Argentina[J]. Journal of Range Management, 1987, 40(1):6-9.

[9] 刘玉燕,王艳荣,杨迎春.半干旱地区草坪草和主要杂草水势的日变化特征分析[J].内蒙古大学学报,2003,34(3):308-311.

[10] 刘昌明.土壤植物大气系统水分运行的界面过程研究[J].地理学报,1997,52(4):366-373.

[11] 徐军亮,马履一,王华田.油松林人工林 SPAC 水势梯度的时空变异[J].北京林业大学学报,2003,25(5):1-5.

(上接第 99 页)

益。在指标的选取上,还应该考虑水质的评价指标和其它一些对森林涵养水源功能发挥有明确的影响而且容易获得数据的指标,这方面的研究需要更多的试验。

参考文献:

[1] (美)Singh V P. 水文系统流域模拟[M]. 郑州:黄河水利出版社,2000.32-33.

[2] (日)中野秀章.森林水文学[M].北京:中国林业出版社,1983.109-130.

[3] 程根伟,等.山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M].北京:科学出版社,2004.83-84.

[4] 高人,周广柱.辽宁东部山区几种主要森林植被类型的蒸腾作用[J].辽宁农业科学,2000,(6):5-8.

[5] 黄礼隆,陈祖铭,任守贤.森林水文研究方法[J].四川林业科技,1994,15(1):14-46.

[6] 黄锡荃.水文学[M].北京:高等教育出版社,2001.51-55.

[7] 姜文来.森林涵养水源的价值核算研究[J].水土保持学报,2003,17(2):34-36.

[8] 蒋文伟,等.安吉主要森林类型水源涵养功能的分析与评价[J].南京林业大学学报(自然科学版),2002,(7):71-74.

[9] 李祚泳,丁晶,彭荔红.环境质量评价原理与方法[M].北京:化学工业出版社,2004.117-161.

[10] 张德成.辽东山区森林涵养水源效益的评价与补偿研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2005.

[11] 张万儒 许本彤.森林土壤定位研究方法[M].北京:中国林业出版社,1986.17-58.

[12] 张增哲,余新晓.中国森林水文研究现状和主要成果[J].北京林业大学学报,1988,10(2):79-81.

[13] 张志强.森林水文:过程与机制[M].北京:中国环境科学出版社,2002.100-129.

[14] 赵人俊.流域水文模拟[M].北京:水利电力出版社,1984.71-83.

[15] Richard L. Forest Hydrology[M]. Columbia University Press, USA.1980.

[16] Yang D W. Comparison of different distributed hydrological models for characterization of catchment spatial variability[J]. Hydro. Process, 2000,(14):68-72.