

辽宁省东部山区 5 种森林植被类型水文生态效益综合评判*

高 人

周广柱

(福建师范大学地理学院 福州 350007) (沈阳农业大学林学院 沈阳 110161)

摘 要 利用层次分析与 Fuzzy 数学相结合方法,对辽宁省东部山区 5 种森林植被类型水源涵养能力进行了多目标综合评判。首先利用层次分析法确定了评价因子林冠截留、林冠蒸散、枯落物蓄水、土壤容重、非毛管孔隙度、初渗速率、稳渗速率、土壤总蓄水和土壤有效水的权重集为 $C = (0.0245, 0.0051, 0.1993, 0.0109, 0.0762, 0.0565, 0.2827, 0.0573, 0.2866)$, 然后利用最大模糊熵原则确定了评价因子的隶属函数,最后利用 Fuzzy 综合评判得出油松、落叶松、红松、柞木林、杂木林评价结果模糊子集为 $B = (0.4686, 0.3784, 0.4145, 0.6128, 0.4808)$, 结果表明阔叶林水源涵养效益高于针叶林,其中柞木林效益最佳。

关键词 森林水文 综合评判 层次分析 模糊数学

Multi-objective decision-making on hydro-ecological efficiencies for five forest vegetation types in east Liaoning mountainous region. GAO Ren (Geography College, Fujian Normal University, Fuzhou 350007), ZHOU Guang-Zhu (Forestry College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161), *CJEA*, 2003, 11(2): 122~125

Abstract With the method of analytical hierarchical process (AHP) combined with fuzzy mathematics, multi-objective decision-making method on water-stored capacities for five typical forest vegetations in east Liaoning mountainous region has been made on the base of some hydro-ecological indices measured. By means of AHP, the weight set, $C = (0.0245, 0.0051, 0.1993, 0.0109, 0.0762, 0.0565, 0.2827, 0.0573, 0.2866)$ is firstly determined for such evaluation factors as canopy interception, canopy evapotranspiration, litter water storage, soil bulk density, noncapillary porosity, initial infiltration rate, final infiltration rate, total soil water storage, available soil water storage, then the fuzzy functions are established for these factors according to the principle of maximum fuzzy entropy, and finally, using the fuzzy multi-objective decision-making method, the fuzzy subset of evaluation results, $B = (0.4686, 0.3784, 0.4145, 0.6128, 0.4808)$ is evolved for the Chinese pine, larch, the korean pine, oak, weed trees, showing that the hardwoods enjoy higher water stored capacity than conifers, and the oak forests show the best.

Key words Forest hydrology, Multi-objective decision-making, Analytical hierarchical process, Fuzzy mathematics

森林水源涵养功能是森林水文生态功能的重要方面,分析比较不同森林类型水源涵养系统中各组分功能强弱以综合评价其水源涵养能力强弱,是水文生态研究的重要方面,但目前尚无一套较完善的对森林涵养水源功能进行客观和科学评价的方法,为此本研究采用美国学者 Saaty T.L. 的层次分析法^[1]和模糊数学方法,研究提出一套以定量为主,定性和定量相结合的评价方法。

1 试验材料与方法

研究区域位于辽宁省东部山区,该区属低山丘陵,由几条 NE-SW 走向山脉构成,地势由北向南逐渐升高,水系主要属辽河流域,主要支流浑河、太子河均流贯于东部山区,属温带湿润季风气候,年降水量 750~1200mm,年均气温 5~8℃,土壤多为棕色森林土和暗棕色森林土。全区属长白植物区系,地带性植物群落为以红松为主针阔混交林,目前绝大部分已演变为天然次生林,天然次生林占森林总面积的 84%,其中柞木林占 54%,杂木林占 30%。人工林约占 16%,以落叶松林、油松林、红松林为主,现已划定为水源涵养用材林区,水源涵养林体系建设已成为该区森林生态环境建设的主要任务。评价因子除林冠截留、林冠蒸散用固定标准地方法外,其他因子如枯落物蓄水、土壤容重、土壤非毛管孔隙度、土壤初渗速率、土壤稳渗速率、土壤总蓄水、土壤有效水等均用临时标准地方法测定。

* 辽宁省科委科技攻关项目(92203004)

收稿日期: 2002-08-26 改回日期: 2002-09-19

2 结果与分析

2.1 评价指标体系

根据选择评价指标的原则,在分析森林涵养水源机理基础上采用系统分析方法,将森林涵养水源能力分为林冠蒸发与截留、地被物截留蓄水、土壤渗透性和土壤蓄水能力 5 个方面,并将各层次分解为若干具体指标,形成综合评价指标体系(见图 1)。

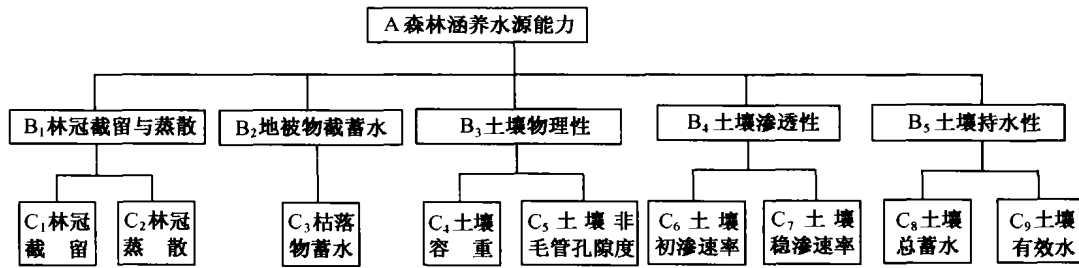


图 1 森林涵养水源效益综合评价指标体系

Fig. 1 Multi-objective decision-making on forest water conservation efficiency

2.2 评价指标权重确定——构造判断矩阵

本研究采用 Saaty T. L. 的两两比较方法,即先分析每 2 个指标间相对重要性以构造综合判断矩阵,再计算该矩阵标准化特征向量并进行一致性检验,从而得出各指标对森林综合涵养水源能力的效应,即权重。所谓判断矩阵是针对上 1 层次(准则层)某个元素与本层次中与之有关元素之间作相对重要性的两两比较,并用矩阵表示的形式。本研究中 B 层以 A 层为准则层, C 层以 B 层为准则层,各因子重要性用 Saaty T. L. 的 1~9 级标度法确定。假设准则层 $B_k (k=1,2,3,4,5)$ 的总权重为 b_k ,下层指标中与 B_k 关联的指标有 r 个,记为 $C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_r^{(k)}$,先计算相对于准则 B_k 的下层指标 $C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_r^{(k)}$ 的单权重 $W_1^{(k)}, W_2^{(k)}, \dots, W_r^{(k)}$ 。根据 Saaty T. L. 的两两比较重要性法则确定出 C_{ij} 的值,即构成一个两两比较的判断矩阵:

$$(B_k - C) \begin{cases} & C_1, C_2, \dots, C_r \\ C_1 & C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1r} \\ C_2 & C_{21}, C_{22}, \dots, C_{2r} \\ \dots & \dots, \dots, \dots, \dots \\ C_r & C_{r1}, C_{r2}, \dots, C_{rr} \end{cases} \quad (1)$$

任何判断矩阵均应满足 $C_{ij} = 1, C_{ij} = C_{ji}^{-1}$ 。有了判断矩阵 $(B_k - C)$ 后,即可求出其最大特征值 λ_{\max} 和相应的标准化特征向量 $W^{(k)} = [C_1(k), C_2(k), \dots, C_r(k)]$,它满足条件:

$$(B_k - C)W^{(k)} = \lambda_{\max} W^{(k)} \quad (2)$$

式中 λ_{\max} 为矩阵 $B_k - C$ 的最大特征根, W 为对应于 λ_{\max} 的正规化特征向量。当指标 C_i 与标准 B_k 无关联时,定义 $C_i^{(k)} = 0$,于是得出单一准则 B_k 下的下层各指标单权重 $C_1^{(k)}, C_2^{(k)}, \dots, C_r^{(k)}$ 。

2.3 一致性检验

由于专家构造的比较矩阵与理论比较矩阵可能有误差,故专家构造的 n 阶比较矩阵最大特征值 λ_{\max} 不一定等于 n 。为防止这种误差,取 λ_{\max} 与 n 的相对误差作为比较矩阵一致性指标,即:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

其中, n 为判断矩阵的阶数。再考虑到参评者对问题认识不同所引起的误差,对上述一致性指标 CI 乘上系数 $1/RI$, RI 为与判断矩阵同阶的平均随机一致性指标,其值随判断矩阵阶数 n 的增加而提高,当 n 由 1 增加到 9 时 CI 由 0 提高到 1.45。当判断矩阵满足 $CR = CI/RI < 0.1$ 时,则认为比较矩阵具有满意的一致性,否则需调整比较矩阵,使其达到最终的满意一致性。

表 1 判断矩阵 A - B 合成权重

Tab.1 Judgement matrix A - B and composite weights

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	W
B ₁	1	1/5	1/7	1/9	1/9	0.0305
B ₂	5	1	3	1	1/4	0.1993
B ₃	7	1/3	1	1/7	1/9	0.0871
B ₄	9	1	7	1	1	0.3392
B ₅	9	4	9	1	1	0.3439

当满足 $CR = \frac{CI}{RI} < 0.1$ 时,认为达到

满意的一致性,否则需调整判断矩阵。按照图 1 所构造的森林水源涵养系统递阶层次结构,本研究构造判断矩阵并计算被比较元素的相对权重(见表 1)及 C 层合成权重(见表 2),B₁ - C、B₂ - C、B₃ - C、B₄ - C、B₅ - C 的合成权重结果略。根据各评价因素的特点,采用戒下型、升半正态、升半西哥和升半梯型 4 种分布类型对林冠截留、枯落物层拦蓄降水、土壤非毛管孔

隙度、土壤初渗速率、土壤稳渗速率及土壤蓄水量的隶属函数进行模拟,采用降半西哥分布、降半正态分布和降半梯型分布对土壤容重、森林蒸散耗水的隶属函数进行模拟。由于对同一因素利用多种类型隶属函数进行模拟,故本研究选用最大模糊熵原则确定最优隶属函数模型^[3]。模糊熵为:

$$L(A) = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^n |\mu_A(x_i) - \mu_{A_0}(x_i)| \quad (7)$$

表 3 不同森林类型综合评判因素隶属函数值

Tab.3 Fuzziness of factors involved in the multi-objective decision-making

因素 Factors	油松 Chinese pine	落叶松 Larch	红松 Korean pine	柞木林 Oak	杂木林 Weed tree	隶属函数 Fuzzy function	参数 Parameters
林冠截留率	0.877	0.877	0.899	0.867	0.897	戒下型	a = 11.54 b = 2.0 c = 0.10
蒸发散耗水	0.407	0.440	0.403	0.491	0.552	降半正态型	k = 1.26 a = 0.26
枯落物蓄水	0.499	0.785	0.773	0.560	0.215	戒下型	b = 2.0 c = 1.0
土壤容重	0.520	0.550	0.580	0.588	0.587	降半正态型	k = 0.56
非毛管孔隙度	0.795	0.612	0.658	0.883	0.841	升半西哥型	k = 177.78 a = 0.05
初渗速率	0.363	0.141	0.195	0.684	0.631	升半梯型	a ₁ = 19.274 a ₂ = 80.46
稳渗速率	0.474	0.250	0.320	0.610	0.540	升半梯型	a ₁ = 1.035 a ₂ = 5.505
总蓄水量	0.434	0.400	0.390	0.715	0.530	升半西哥型	k = 0.000025 a = 200.0
有效蓄水量	0.344	0.150	0.139	0.527	0.430	升半西哥型	k = 0.000064 a = 50.0

其中 A₀ 为与模糊子集有最小欧氏距离的普通集合:

$$\mu_{A_0}(x_i) = \begin{cases} 0 & \mu_A(x_i) < 0.5 \\ 1 & \mu_A(x_i) \geq 0.5 \end{cases} \quad (8)$$

2.4 计算总权重及隶属函数的确定

B 层各准则的总权重即它的单权重,在数值上等于(A - B)判断矩阵的特征向量,那么 C 层各指标总权重为:

$$C_i = \sum_{k=1}^5 b_k C_i^{(k)} \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (4)$$

计算总权重时应进行一致性检验,首先计算:

$$CI = \sum_{k=1}^5 b_k CI_k \quad (5)$$

$$RI = \sum_{k=1}^5 b_k RI_k \quad (6)$$

表 2 C 层合成权重

Tab.2 Composite weights of factors in C stratum

A	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅	W
C ₁	0.8330	0	0	0	0	0.0254
C ₂	0.1667	0	0	0	0	0.0051
C ₃	0	1	0	0	0	0.1194
C ₄	0	0	0.1250	0	0	0.0109
C ₅	0	0	0.8750	0	0	0.0762
C ₆	0	0	0	0.1667	0	0.0565
C ₇	0	0	0	0.8333	0	0.2827
C ₈	0	0	0	0	0.1667	0.0573
C ₉	0	0	0	0	0.8333	0.2866

各因子隶属函数参数及其隶属度见表 3。

2.5 Fuzzy 综合评判

Fuzzy 综合评判是单因素权重与其评价的复合重作用,即它是从评价因素模糊子集到评价结果模糊子集的模糊变换,该评判模型为:

$$\widetilde{A} \circ \widetilde{R} = \widetilde{B} \quad (9)$$

式中, \widetilde{A} 为因子权重子集:

$$\widetilde{A} = (a_1, a_2, a_3, \dots, a_m) \quad (10)$$

\widetilde{R} 为从权重子集到评判结果子集转换的一个模糊关系:

$$\widetilde{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ M & M & \dots & M \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

\widetilde{B} 为评价结果模糊子集:

$$\widetilde{B} = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_n) \quad (12)$$

其中:

$$b_i = a_1 r_{1i} \oplus a_2 r_{2i} \oplus \dots \oplus a_m r_{mi} \quad (13)$$

$$a \oplus b = \min(1, a + b) \quad (14)$$

本文评价因素权重子集为:

$$\widetilde{A} = (0.0254, 0.0051, 0.1993, 0.0109, 0.0762, 0.0565, 0.2827, 0.0573, 0.2866) \quad (15)$$

模糊关系子集为:

$$\widetilde{R} = \begin{bmatrix} 0.914 & 0.877 & 0.899 & 0.867 & 0.897 \\ 0.407 & 0.440 & 0.403 & 0.491 & 0.552 \\ 0.499 & 0.785 & 0.773 & 0.560 & 0.215 \\ 0.520 & 0.550 & 0.580 & 0.580 & 0.587 \\ 0.790 & 0.612 & 0.658 & 0.883 & 0.841 \\ 0.363 & 0.141 & 0.195 & 0.684 & 0.631 \\ 0.474 & 0.250 & 0.320 & 0.610 & 0.540 \\ 0.434 & 0.400 & 0.390 & 0.715 & 0.530 \\ 0.344 & 0.150 & 0.193 & 0.527 & 0.430 \end{bmatrix} \quad (16)$$

通过 $\widetilde{A} \circ \widetilde{R} = \widetilde{B}$ 转换得评价结果模糊子集为:

$$\widetilde{B} = (0.4686, 0.3784, 0.4145, 0.6128, 0.4808) \quad (17)$$

辽宁省东部山区 5 种林分类型水源涵养效益的 Fuzzy 综合评判结果表明,阔叶林水源涵养效益优于针叶林,前者隶属于涵养效益大的模糊子集程度为后者 1.3 倍。辽宁省东部山区 5 种林分类型水源涵养效益属于效益高的模糊子集隶属程度为柞木林(0.6128) > 杂木林(0.4808) > 油松林(0.4686) > 红松林(0.4145) > 落叶松林(0.3784),故该地区现有水源涵养林类型中阔叶林最有利于水源涵养作用的发挥。

3 小 结

利用层次分析法确定的 9 个评价因子林冠截留、林冠蒸散、枯落物蓄水、土壤容重、土壤非毛管孔隙度、土壤初渗速率、土壤稳渗速率、土壤总蓄水、土壤有效水的权重集为 $C = (0.0245, 0.0051, 0.1993, 0.0109, 0.0762, 0.0565, 0.2827, 0.0573, 0.2866)$ 。利用 Fuzzy 模糊综合评判得出油松、落叶松、红松、柞木林、杂木林评价结果模糊子集为 $\widetilde{B} = (0.4686, 0.3784, 0.4145, 0.6128, 0.4808)$,结果表明阔叶林水源涵养效益高于针叶林,其中柞木林效益最佳。

参 考 文 献

- 1 许树柏. 实用决策方法——层次分析法原理. 天津:天津大学出版社,1988