

滇中城市水源地不同林型水源涵养功能评价

曾建军, 史正涛, 张华伟, 常龙芳, 陈严武, 苗武

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 昆明 650500)

摘要: 森林枯落物层和土壤层持水能力监测是评价森林水源涵养功能优劣与否的两个重要环节。为了更直观、简便、科学、合理地对滇中城市水源地不同林型水源涵养功能进行评价, 以森林不同林型枯落物持水量、土壤层理化特性及土壤持水能力研究为基础, 选取影响林地枯落物层和土壤层持水功能的 17 个代表性评价指标, 建立滇中城市水源地不同林型水源涵养功能评价指标体系。运用欧式贴近度的概念及模糊物元模型, 构建基于欧式贴近度的模糊物元模型, 并以楚雄市九龙甸水源地 4 种不同林型(混交林、人工桉树林、灌木林、青冈栎林)为例进行实证研究, 得到欧式贴近度大小顺序为: $R_{混交林} > R_{青冈栎林} > R_{灌木林} > R_{人工桉树林}$, 表明混交林综合水源涵养功能最好, 其次为青冈栎林和灌木林, 人工桉树林最差。

关键词: 水源涵养; 欧式贴近度; 模糊物元模型; 九龙甸水源地

中图分类号: S727.21

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0084-04

Evaluation on Water Conservation Function of Different Forest Types in Urban Water Sources of The Central Yunnan

ZENG Jian-jun, SHI Zheng-tao, ZHANG Hua-wei, CHANG Long-fang, CHEN Yan-wu, MIAO Wu

(College of Tourism & Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Forest litter layer and soil layer water-holding capacity are two important links to monitor whether the function of forest water conservation is good or not. In order to evaluate the water conservation function for different types of forest in central Yunnan urban water sources intuitively, simply, scientifically and reasonably, and on the basis of the different types of forest litter layer water-holding capacity, the physical and chemical properties of soil layer, and the soil water-holding capacity, 17 representative evaluation indicators which impact the forest litter layer and soil layer water-holding capacity as the evaluative indices of water conservation function was collected for different types of forest in central Yunnan urban water sources. The water conservation function of different forest types in Jiulongdian, Chuxiong was evaluated by using the Euclid approach degree fuzzy matter element model. The size of the European approach degree is in the order of $R_{mixed\ forest} > R_{cyclobalanopsis\ glauca\ forest} > R_{shrub} > R_{man-made\ eucalyptus\ forest}$. It concludes that comprehensive water conservation function of the mixed forest is the best, followed by the cyclobalanopsis glauca forest and the shrubs, and the planted eucalyptus forest is the worst.

Key words: water conservation; european approach degree; fuzzy matter element model; Jiulongdian water sources

森林水源涵养功能的优劣与分布与森林各层次(林冠层、枯落物层和土壤层)的传输过程相关, 且主要取决于枯落物的蓄水能力和土壤层的贮水能力等^[1-2]。不同类型林地的植物生物学特性及林分结构

不同。探讨不同林型与水源涵养功能之间的关系^[3], 可为森林健康监测、评价及其合理经营提供一定的理论依据。现阶段对于森林的水源涵养功能, 国内外已有大量研究, 但这些研究都是针对某一特定层的定性

研究,如树冠穿透降雨的空间异质性^[4],枯落物层水文生态效应^[5],土壤层水文物理特性与涵养水源功能^[6-7],而在整体层次水源涵养功能研究和评价方法的选用也显得很片面,为此很多学者开展了森林水源涵养功能的综合评价方法研究^[8-12]。

滇中地区作为云南省的人口聚集区和经济核心区,经济发展处于云南省领先水平,但是人均水资源量仅为全省平均水平的31%^[13]。受岩溶地貌类型制约及复杂地质环境的作用,滇中城市工农业生活用水主要依靠水源地水库提供。因此,对滇中城市水源涵养林进行研究,对该区的生物多样性保护、水源涵养及水资源的可持续发展有着深远意义。本文拟通过对楚雄市九龙甸水源地4种林型枯落物蓄水能力和土壤层的贮水功能研究的基础上,利用欧式贴近度的模糊物元模型对不同林型水源涵养功能进行综合评价,筛选出最好的林型,以期对楚雄市九龙甸水源地森林营造、退化森林生态系统的恢复提供基础数据,为森林涵养水源的评价提供参考依据。

1 不同林型水源涵养功能的模糊物元模型评价

1.1 不同林型水源涵养功能的复合模糊物元

以有序三元组(事物、特征、模糊量值)作为描述事物的基本单元,称为模糊物元^[14]。如果 m 个事物有 n 项特征(C_1, C_2, \dots, C_n)与相应的模糊物元量值(U_{ij})来描述事物的复合物元,则称 m 个事物的 n 维复合模糊物元。建立不同林型水源涵养功能的复合模糊物元:

$$R_{mm} = \begin{bmatrix} & M_1 & \cdots & M_m \\ C_1 & U_{11} & \cdots & U_{m1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_n & U_{1n} & \cdots & U_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: M_i ——研究区的第 i 个林型($i=1, 2, \dots, m$);
 C_k ——某研究区林型水源涵养功能的第 k 个特征($k=1, 2, \dots, n$)。

1.2 不同林型水源涵养功能的差平方复合模糊物元

从某研究区不同林型水源涵养功能的隶属度复合模糊物元中可选择不同林型水源涵养功能的评价基准复合模糊物元。

$$R_{0n} = \begin{bmatrix} & M_0 \\ C_1 & u_{01} \\ C_2 & u_{02} \\ \vdots & \vdots \\ C_n & u_{0n} \end{bmatrix} \quad (2)$$

若以 Δ_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$)表示不同林型水源涵养功能的基准模糊物元 R_{0n} 与不同林型水源涵养功能的复合模糊物元 R_{mm} 中各项差的平方,则组成不同林型水源涵养功能的差平方复合模糊物元 R_{Δ} ,即:

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & \cdots & M_m \\ C_1 & \Delta_{11} & \Delta_{21} & \cdots & \Delta_{m1} \\ C_2 & \Delta_{12} & \Delta_{22} & \cdots & \Delta_{m2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ C_m & \Delta_{1m} & \Delta_{2m} & \cdots & \Delta_{mm} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中, $\Delta_{ij} = [u_{0j} - u_{ij}]^2$; u_{0j} 表示不同林型水源涵养功能的基准模糊物元 R_{0n} 的模糊量值, u_{0j} 取 1.0 ($j=1, 2, \dots, 17$); u_{ij} 表示不同林型水源涵养功能的复合模糊物元 R_{mm} 模糊量值。

1.3 不同林型水源涵养功能的评价指标权重

本文采用反映指标特征值之间的统计参数一变异系数确定评价指标的权重,其计算公式如下:

$$D_j = \frac{1}{\bar{X}_j} \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (X_j - X_{ij})^2} \quad (4)$$

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j} \quad (5)$$

式中: \bar{X}_j ——评价矩阵中第 j 个指标的均值; D_j ——第 j 个评价指标的变异系数; W_j ——第 j 个评价指标的权重值; X_{ij} ——第 i 个林型第 j 个评价指标对应的数值。

1.4 欧式贴近度

由权重和差平方模糊物元可以计算欧式贴近度^[15]。

$$pH_i = 1 - \sqrt{\sum_{j=1}^n W_j \Delta_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, m) \quad (6)$$

式中: pH_i ——第 i 个评价区域的欧式贴近度。 pH_i 值越大,表示第 i 区域与最优值区域越接近,说明越好;反之,则表示与最优值区域相差越远,表示越差。

2 应用实例

本文以楚雄市九龙甸水源地为例进行实证研究。九龙甸水源地作为楚雄市的主要水源地,位于云南省中部楚雄市吕合镇下紫甸村,地处 $102^{\circ}45' - 102^{\circ}59'E, 25^{\circ}08' - 25^{\circ}27'N$ 之间,集水面积为 257.6 km^2 。属亚热带季风气候,多年平均气温为 $15.6^{\circ}C$,多年平均降雨量为 864 mm 。雨季一般为5—10月,降水量占全年雨量的85%;旱季一般为11—4月,降水量占全年雨量的15%;土壤类型以棕壤为主;植被类型主要有云南松(*Pinus yunnanensis*)次生林、天然

次生青冈栎 (*Cyclobalanopsis glauca*)、人工桉树林 (*Eucalyptus*) 和灌木丛 (*shrub*)。

2.1 指标体系构建

建立的指标体系应能反映出各评价指标在水源地不同林型水源涵养功能的影响程度。由于林地水源涵养功能的优劣主要取决于枯落物层的蓄水能力

和土壤层的贮水能力。因此,选择水源地不同林型水源涵养功能的两个主要影响因子(枯落物层和土壤层),5个评价对象(枯落物厚度、枯落物的蓄积量、枯落物的持水能力、土壤持水能力、土壤理化性质),17个评价指标建立不同林型水源涵养功能指标体系(表1)。

表 1 不同林型水源涵养功能指标体系

目标层(D)	系统层(A)	准则层(B)	指标层(C)	量纲
不同林型水源涵养功能(D)	枯落物层(A ₁)	枯落物厚度(B ₁)	枯落物厚度未分解层(C ₁)	cm
			枯落物厚度半分解层(C ₂)	cm
		枯落物蓄积量(B ₂)	枯落物蓄积量未分解层(C ₃)	t/hm ²
			枯落物蓄积量半分解层(C ₄)	t/hm ²
		枯落物持水能力(B ₃)	自然含水率(C ₅)	%
			最大持水量(C ₆)	t/hm ²
	最大持水率(C ₇)		%	
	有效拦蓄量(C ₈)		t/hm ²	
	有效拦蓄率(C ₉)		%	
	土壤持水能力(B ₄)	自然含水率(C ₁₀)	%	
		饱和含水量(C ₁₁)	t/hm ²	
		毛管持水量(C ₁₂)	t/hm ²	
		有效持水量(C ₁₃)	t/hm ²	
	土壤层(A ₂)	土壤理化性质(B ₅)	容重(C ₁₄)	g/cm ³
			总孔隙度(C ₁₅)	%
			毛管孔隙度(C ₁₆)	%
			非毛管孔隙度(C ₁₇)	%

2.2 数据来源及预处理

基于已有的样方调查法、烘干法、浸泡法、环刀法,对滇中城市水源地4种林型森林枯落物及土壤持水特性的研究^[16],参照文献^[16]给出的滇中4种主要林型的进行指标确定(表2)。

对各评价指标进行从优隶属度计算,可分为越大越优和越小越优两类:

$$u_{ij} = (x_{ij} - X_{ij}) / (X_{ij} - X_{ij}) \quad (7)$$

$$u_{ij} = (X_{ij} - x_{ij}) / (X_{ij} - X_{ij}) \quad (8)$$

式中: u_{ij} ——水源地第*i*个林型第*j*项特征对应的模糊量值($i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$); x_{ij} ——第*i*个林型第*j*项特征对应的量值($i=1,2,\dots,m;j=1,2,\dots,n$); X_{ij} ——某林型中第*j*项特征所对应的所有量值中的最大值; X_{ij} ——某林型中第*j*项特征所对应的所有量值中的最小值。

2.3 评价结果及分析

利用欧式贴近度模糊物元模型对楚雄市九龙甸水源地不同林型水源涵养功能进行评价:

首先,由式(7)、(8)得到楚雄市九龙甸水源地不同林型水源涵养功能的目标优隶属度模糊物元 R :

并通过式(3)计算楚雄市九龙甸水源地不同林型

水源涵养功能的差平方模糊物元矩阵 R_{Δ} :

表 2 楚雄市九龙甸水源地不同林型水源涵养功能评价指标数据

林型	混交林(M ₁)	灌木林(M ₂)	人工桉树林(M ₃)	青冈栎林(M ₄)
枯落物厚度未分解层(C ₁)	1.05	0.55	1.87	1.45
枯落物厚度半分解层(C ₂)	1.21	1.50	0.60	1.10
枯落物蓄积量未分解层(C ₃)	2.53	1.41	3.56	3.22
枯落物蓄积量半分解层(C ₄)	3.42	3.69	0.81	2.72
自然含水率(C ₅)	6.28	9.98	3.14	4.23
最大涵养量(C ₆)	10.42	10.59	4.89	10.47
最大涵养率(C ₇)	152.69	180.40	206.15	166.60
有效拦蓄量(C ₈)	3.61	2.16	2.92	4.47
有效拦蓄率(C ₉)	123.52	143.37	203.01	137.40
自然含水率(C ₁₀)	1.34	1.59	1.33	1.45
饱和含水量(C ₁₁)	49.54	39.89	49.78	45.35
毛管涵养量(C ₁₂)	15.57	32.23	15.06	12.82
有效涵养量(C ₁₃)	33.97	7.66	34.73	32.53
容重(C ₁₄)	11.56	20.23	10.99	9.07
总孔隙度(C ₁₅)	990.80	797.80	995.60	907.00
毛管孔隙度(C ₁₆)	311.40	644.60	301.10	256.30
非毛管孔隙度(C ₁₇)	679.40	153.20	694.50	650.40

$$R = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_1 & 0.3788 & 0 & 1 & 0.6818 \\ C_2 & 0.6778 & 1 & 0 & 0.5556 \\ C_3 & 0.5209 & 0 & 1 & 0.8419 \\ C_4 & 0.9063 & 1 & 0 & 0.6632 \\ C_5 & 0.4591 & 1 & 0 & 0.1594 \\ C_6 & 0.9702 & 1 & 0 & 0.9789 \\ C_7 & 0 & 0.5183 & 1 & 0.2602 \\ C_8 & 0.6277 & 0 & 0.3290 & 1 \\ C_9 & 0 & 0.2497 & 1 & 0.1746 \\ C_{10} & 0.0385 & 1 & 0 & 0.4615 \\ C_{11} & 0.9759 & 0 & 1 & 0.5221 \\ C_{12} & 0.1417 & 1 & 0.1154 & 0 \\ C_{13} & 0.9719 & 0 & 1 & 0.9187 \\ C_{14} & 0.2231 & 1 & 0.1720 & 0 \\ C_{15} & 0.9757 & 0 & 1 & 0.5521 \\ C_{16} & 0.1419 & 1 & 0.1154 & 0 \\ C_{17} & 0.9721 & 0 & 1 & 0.9185 \end{bmatrix}$$

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & M_1 & M_2 & M_3 & M_4 \\ C_1 & 0.3859 & 1 & 0 & 0.1013 \\ C_2 & 0.1038 & 0 & 1 & 0.1975 \\ C_3 & 0.2295 & 1 & 0 & 0.0250 \\ C_4 & 0.0088 & 0 & 1 & 0.1134 \\ C_5 & 0.2926 & 0 & 1 & 0.7066 \\ C_6 & 0.0009 & 0 & 1 & 0.0004 \\ C_7 & 1 & 0.2320 & 0 & 0.5473 \\ C_8 & 0.1386 & 1 & 0.4502 & 0 \\ C_9 & 1 & 0.5630 & 0 & 0.6813 \\ C_{10} & 0.9245 & 0 & 1 & 0.2900 \\ C_{11} & 0.0006 & 1 & 0 & 0.2006 \\ C_{12} & 0.7367 & 0 & 0.7825 & 1 \\ C_{13} & 0.0008 & 1 & 0 & 0.0066 \\ C_{14} & 0.6036 & 0 & 0.6856 & 1 \\ C_{15} & 0.0006 & 1 & 0 & 0.2006 \\ C_{16} & 0.7363 & 0 & 0.7825 & 1 \\ C_{17} & 0.008 & 1 & 0 & 0.0007 \end{bmatrix}$$

其次,据式(4)、(5)计算楚雄市九龙甸水源地不

同林型水源涵养功能的各评价指标权重 R_{Δ} :

$$R_{\Delta} = \begin{bmatrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 & C_7 & C_8 & C_9 \\ W_i & 0.0805 & 0.0597 & 0.0622 & 0.0858 & 0.0895 & 0.0541 & 0.0227 & 0.0526 & 0.0406 \\ & C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} & C_{17} & \\ W_i & 0.0149 & 0.0176 & 0.0831 & 0.0843 & 0.0672 & 0.0177 & 0.0831 & 0.0843 & \end{bmatrix}$$

再次,由差平方复合模糊物元矩阵和指标权重,据式(6)得楚雄市九龙甸水源地 4 种林型林地水源涵养功能的欧式贴近度 R_{pH_i} :

$$R_{pH_i} = \begin{bmatrix} & \text{混交林} & \text{灌木林} & \text{人工桉树林} & \text{青冈栎林} \\ pH_i & 0.6740 & 0.5727 & 0.5559 & 0.6454 \end{bmatrix}$$

由计算得到的欧式贴近度大小 ($R_{\text{混交林}} > R_{\text{青冈栎林}} > R_{\text{灌木林}} > R_{\text{人工桉树林}}$) 不难看出,混交林欧式贴近度较高,说明混交林水源涵养功能较强;青冈栎林、灌木林欧式贴近度居中,说明它们水源涵养功能一般;人工桉树林的欧式贴近度很低,说明人工桉树林水源涵养功能较弱。

3 结论

(1) 利用构建的欧式贴近度模糊物元模型,对楚雄市九龙甸水源地不同林型水源涵养功能进行了评价,结果表明,混交林的水源涵养功能较强;青冈栎林、灌木林水源涵养功能一般;人工桉树林水源涵养功能较弱。

(2) 利用欧式贴近度模糊物元模型对楚雄市九龙甸水源地不同林型水源涵养能力进行评价时,利用

变异系数求取权重,对原始数据的使用在一定程度上减少了权重确定的主观性。

(3) 欧式贴近度的模糊物元模型与文献[16]传统分析研究结果一致,也与实际情况相吻合,充分证明九龙甸水源混交林涵养功能最强。

(4) 同时,建立的欧式贴近度的模糊物元模型对水源涵养功能的评价提供了一种新的思路,对于数据的分析更加直接,所得结果也较为准确。

参考文献:

[1] 鲁绍伟,毛富玲,靳芳,等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究,2005,12(4):223-226.
 [2] 张伟,杨新兵,张汝松,等. 冀北山地不同林分枯落物及土壤的水源涵养功能评价[J]. 水土保持通报,2011,31(3):208-212.
 [3] 徐洪亮,满秀玲,盛后财,等. 大兴安岭不同类型落叶松天然林水源涵养功能研究[J]. 水土保持研究,2011,18(4):92-96.
 [4] 时忠杰,王彦辉,徐丽宏,等. 六盘山华山松林降雨再分配及其空间变异特征[J]. 生态学报,2009,29(1):76-85.
 [5] 莫菲,于澎涛,王彦辉,等. 六盘山华山落叶松林和红桦林的枯落物持水特征及其截持降雨过程[J]. 生态学报,2009,29(6):2868-2876.

-3.822, S1)

Grid; S3 = con(S > 5.5 & S < 30, 1.347 * S - 1.675, S2)

Grid; S4 = con(S >= 30, 2.004 * S - 21.483, S3)

其中 S 是待校正的 SLP 20 m, S4 是校正后的 RSLP 20 m。

致谢:感谢鲁东大学何福红副教授为本文提供的 1:1 万地形图数据。

参考文献:

- [1] Carter J. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs [J]. *Cartographica*, 1992, 29(1): 22-34.
- [2] Thompson J A, Bell J C, Butler C A. Digital elevation model resolution: Effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling [J]. *Geoderma*, 2001, 100(1): 67-89.
- [3] 刘学军, 龚健雅, 周启鸣, 等. DEM 结构特征对坡度坡向的影响分析 [J]. *地理与地理信息科学*, 2004, 20(6): 1-5.
- [4] 汤国安, 龚健雅, 陈正江, 等. 数字高程模型地形描述精密度量化模拟研究 [J]. *测绘学报*, 2001, 3(4): 361-365.
- [5] 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 188-189.
- [6] 贾敦新, 汤国安, 王春. DEM 数据误差与地形描述误差对坡度精度的影响 [J]. *地球信息科学学报*, 2009, 11(1): 43-49.
- [7] 王峰, 王春梅. 地形因子与 DEM 分辨率关系的初步研究: 以蒙阴县为例 [J]. *水土保持研究*, 2009, 16(4): 225-229.
- [8] Gao J. Resolution and Accuracy of Terrain Representation by Grid DEMs at a Micro-scale [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 1997, 11(2): 199-221.
- [9] David M W, McCabe G J. Differences in Topographic Characteristics Computed from 100- and 1000-m Resolution Digital Elevation Model Data [J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(6): 987-1002.
- [10] 牛亮, 杨勤科. DEM 尺度变换中直方图相似度计算与应用 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 120-125.
- [11] Yang Q K, Jupp D, Li R, et al. Re-scaling lower resolution slope by histogram matching [C] // Zhou Q M, Lees B G, Tang G A. *Advances in Digital Terrain Analysis*. Berlin: Springer, 2008: 193-210.
- [12] 郭伟玲, 杨勤科, 程琳, 等. 区域土壤侵蚀定量评价中的坡长因子尺度变换方法 [J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(4): 73-78.
- [13] 刘前进, 于兴修. 北方土石山区土壤侵蚀强度垂直景观格局: 以沂蒙山区为例 [J]. *地理研究*, 2010, 29(8): 1471-1483.
- [14] 史云飞, 张玲玲. 鲁中南山地丘陵区土壤侵蚀强度景观格局的动态变化 [J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 2059-2065.
- [15] 史彩宁, 常庆瑞, 王春梅. 基于 GIS 的延安市土壤侵蚀强度等级评价 [J]. *水土保持研究*, 2010, 17(3): 28-31.
- [16] 洋雪芹, 刘占仁, 孟晓云, 等. 云蒙湖流域不同土地利用类型的土壤侵蚀特征分析 [J]. *水土保持研究*, 2012, 8(4): 6-9.
- [17] 杨勤科, 李锐, 梁伟. 区域水土流失地形因子的地图学分析 [J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 56-58.
- [18] Snedecor G W, Cochran W G. *Statistical Methods*. 6th ed [M]. Ames, Iowa: The Iowa State University Press, 1968.
- [19] 刘飞, 范建容, 郭芬芬, 等. 藏北高原区 DEM 高程与坡度值提取的误差分析 [J]. *水土保持通报*, 2011, 31(6): 148-151.
- [6] 丁访军, 王兵. 赤水河下游不同林地类型土壤物理及其水源涵养功能 [J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3): 179-183.
- [7] 李海防, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土高原林草地覆盖土壤水量平衡研究进展 [J]. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 287-291.
- [8] 汪永英, 段文标. 小兴安岭南坡 3 种林型林地水源涵养功能评价 [J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(5): 31-36.
- [9] 刘学全, 唐万鹏, 崔鸿侠, 等. 丹江口库区主要植被类型水源涵养功能综合评价 [J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2009, 33(1): 59-63.
- [10] 莫非, 李叙勇, 贺淑霞, 等. 东灵山林区不同森林植被水源涵养功能评价 [J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 5009-5016.
- [11] 高岗, 秦富仓, 姚云峰, 等. 东北农牧交错带小流域不同林草植被类型水源涵养功能综合评价 [J]. *干旱区环境与资源*, 2009, 23(6): 132-135.
- [12] 聂忆黄, 龚斌, 衣学文, 等. 青藏高原水源涵养能力评估 [J]. *水土保持研究*, 2009, 16(5): 210-213.
- [13] 冯少辉, 李靖, 驻振峰, 等. 云南省滇中地区水资源脆弱性评价 [J]. *水资源保护*, 2010, 26(1): 13-16.
- [14] 马慧群, 刘凌, 陈涛, 等. 模糊差优选模型在水环境安全评价中的作用 [J]. *水电能源科学*, 2008, 26(3): 32-34.
- [15] 陈鸿起, 汪妮, 申毅荣, 等. 基于欧式贴近度的模糊物元模型在水安全评价中的应用 [J]. *西安理工大学学报*, 2007, 23(1): 37-42.
- [16] 常龙芳, 史正涛, 曾建军, 等. 滇中城市水源地森林枯落物及土壤水源特性 [J]. *城市环境与城市生态*, 2013, 26(1): 15-19.

(上接第 87 页)