

基于多因子指数集成的流域面源污染风险研究

刘建昌¹, 严岩¹, 刘峰¹, 丁丁², 赵鸣³

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 国家发展和改革委员会宏观经济研究院, 北京 100824; 3. 北京林业大学园林学院, 北京 100083)

摘要: 为掌握流域面源污染风险的整体趋势, 基于风险评价时, 单个因子对系统某种风险的贡献率可能大于 1 且因子对系统风险贡献呈一定结构性的问题, 定义了风险标准值的概念和算法, 建立了系统风险多因子集成评价方法, 并在地理信息系统支持下对泸沽湖流域进行了案例研究. 结果表明, 泸沽湖流域面源污染流失风险处于较高的水平; 系统风险多因子集成评价法在对多个同类系统间进行比较时, 具有较大的优势; 该方法可以与其他多种方法相结合对系统属性进行全面综合评价.

关键词: 面源污染; 水土流失; 因子集成; 风险评价; 地理信息系统

中图分类号: X321 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)03-0599-08

Risk Assessment and Safety Evaluation Using System Normative Indexes Integration Method for Non-point Source Pollution on Watershed Scale

LIU Jian-chang¹, YAN Yan¹, LIU Feng¹, DING Ding², ZHAO Ming³

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Academy of Macroeconomic Research, National Development and Reform Commission of China, Beijing 100824, China; 3. School of Landscape Architecture, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Decision-makers take non-point source pollution under control as well as possible results from enough information of risk trend of non-point source pollution on watershed scale. System normative indexes integration evaluation method about system risk trend was developed when focusing on that the probability values of some elements attributing to some trend of the system were more than one, and that the system evaluation needed a formula from the system structure. On the basis of analysis on aspects and characteristics of the system risk normalization, a new valuation method, the relationship between the normalization values of the system and the factors was established. The Lugu Lake Watershed in Southwest China was selected as study area to assess the risk of non-point source loss to surface water using this method. The results indicate that ① the wholly risk of non-point source loss to surface water in this watershed is in a high level; ② the system indexes integration evaluation method is an universal method to evaluate a quality or a trend of any system and shows a great power in comparing several systems; ③ the method is helpful to attain an effective and integrated assessment on a system when it is combined with other methods.

Key words: non-point source pollution; soil and water erosion; indexes integration of factors; risk assessment; geographic information system (GIS)

流域面源污染造成的水环境问题日益成为影响流域可持续发展的重要问题. 决策者在流域开发活动中能否重视面源污染控制, 相当多地取决于其能否充分了解该流域面源污染流失的整体危害程度. 目前对流域面源污染流失风险进行评价, 最常用的方法是通过模拟模型, 如利用 AGNPS^[1]、annAGNPS^[2,3]、ANSWERS^[4]、SHE^[5]、STORM^[6]、SWAT^[7]、SWMM^[8]、SWRRB^[7]、WEPP^[9] 等模型, 在 GIS 支持下, 计算营养盐和污染物的时空分布负荷, 识别污染流失的关键源区^[10,11], 对土壤侵蚀风险^[12] 和不同土地利用类型流域的污染输出风险进行模拟评价^[13]. 模型模拟评价需要费时费力的监测工作, 且难以被管理者使用^[14].

把风险从系统属性层面上评价, 实际应用较多的方法主要有事故树分析法 (Fault Tree

Analysis)^[15,16]、层次分析法 (Analysis of Hierarchy Process)^[17]、主成分分析法 (Principal Component Analysis)^[18]、模糊数学法 (Fuzzy Mathematics)^[19]、随机抽样法 (Random Sampling)^[20]、各类指数法 (Indexes Analysis)、系统仿真法 (System Dynamics)^[21] 等. 这些方法为系统属性评价提供了强大的技术支撑, 但在风险评价中也存在一定的局限性. 如层次分析法、主成分分析法、模糊数学法等方法评价系统某种风险时, 并没有考虑系统中各因子对系统风险的贡献是有序的、有结构的. 使用系统仿真方法进行系统模拟评价时, 又存在过多地强调具体的系统结构对系统

收稿日期: 2007-03-14; 修订日期: 2007-06-11

基金项目: 中国科学院重要方向项目 (KZCX3-SW-438); 国家自然科学基金项目 (70325002); 科技部社会公益项目 (2005DIB3J002)

作者简介: 刘建昌 (1974 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为非点源污染控制、生态系统管理, E-mail: amoytiger@163.com

属性的贡献,从而忽视了同类系统属性间的一般比较评价.使用概率统计类方法,如事故树分析法、随机抽样法,往往把一个因子对系统属性的贡献值限定在 0~1 的范围内,忽视了单个因子对系统属性贡献时,因基准面的选择不同,其贡献率有可能超过 1 的情况.使用各类综合指数法评价时,通过使因子标准化可以很好地解决这类问题,但各类综合指数法存在把不同系统的结构固定在一中结构模式下计算和评价的问题.为此,对这类系统评价问题,需要进一步发展新的评价方法.本研究以泸沽湖流域面源污染流失风险评价为例,尝试基于影响流域污染流失风险的单个因子因其基准面选择的不同,对流域水土流失引起的面源污染风险贡献率可能大于 1、且各个影响因子在对整体流域的面源污染流失风险的贡献是有结构性的这 2 点前提,提出了系统风险标准值的概念,建立了系统风险多因子指数集成评价方法,以期为系统属性评价提供新的工具.

1 系统属性标准值的概念

1.1 问题的提出

按照 Wishmeier 的研究^[22],影响水土流失负荷总量的因子主要有降雨径流因子、土壤可蚀性因子、坡度坡长因子、植被作物管理因子和水土保持因子等.但在评价该流域水土流失风险并与别的流域进行比较时,上述各个因子在对流域水土流失整体风险做贡献时,各个因子所做的贡献率之间并不是简单的连乘或连加运算关系,而是要考虑这些因子贡献率间的逻辑关系(结构性),否则在多个流域水土流失风险相比时,很可能得出相反的结果,或者掩盖了某些因子的特殊贡献.

此外,考虑坡度坡长因子对流域水土流失引起的风险(别的因子与此类同).一般情况下坡度坡长越大,越易发生水土流失.坡度坡长因子引起水土流失的风险可以用流域表面积除以其投影面积来代替.地理学上把区域内地球表面与其投影面积之比,称之为地面粗糙度.一般认为地面粗糙度越大对该流域水土流失的风险贡献愈大,即地面越凹凸不平越易发生流失.其他因子对流域水土流失风险的贡献也具有这样的特性,也需要进行标准化.

所以在评价系统该类属性时,需要在因子属性标准化基础上计算系统整体的属性标准值,定义系统标准值和因子标准值之间关系的算法.

1.2 系统某种属性标准值概念的引入

多因子指数集成评价方法可以表征为:系统的

某种属性的标准值是由系统内各因子对系统这种属性贡献的结果,系统属性标准值是多个因子属性标准值按照一定的运算关系计算而来;多个因子在对系统某种属性进行贡献时,就像一个个瓦片一样,有一定的排列顺序和结构,运算关系即按这种结构得出.

1.3 因子对系统某种属性贡献的标准值定义

本研究提出的因子标准值,指对系统总体趋势或可能性属性有贡献的各个因子的值与因子各自基准面值的比值.系统标准值指因子按其逻辑关系进行运算的总和.可知,因子标准值相当于对因子或系统某属性进行标准化的过程.可见标准值具有非负性、可列加性的特点.

1.4 系统属性标准值的串并联算法

系统内不同因子的标准值间的计算关系,满足代数交换律、结合律和分配律法则.假设一个系统的某种属性由若干因子属性按一定结构联结组成,各个因子对系统某属性的贡献方式是不相容的.系统中因子关系有可能是串联、并联、混联,应进行相应的标准值运算.

(1)串联系统 一个由 n 个因子串联组成的系统,出现一定趋势或可能性的标准值,等于 n 个因子对系统标准值的相乘.记因子 $R_i = \{\text{第 } i \text{ 个因子对系统属性有贡献的因子}\}$,其标准值 $G(R_i) = g_i$.则系统的总标准值即等于 n 个因子标准值的乘积,即:

$$G_{\text{串联}} = G(R_1 \cap R_2 \cdots R_n) = G(\bigcap_{i=1}^n R_i) = \prod_{i=1}^n g_i \tag{1}$$

(2)并联系统 一个由 n 个因子并联组成的系统,出现一定程度趋势或可能性的标准值,等于 n 个因子对系统标准值的相加.记因子 $R_i = \{\text{第 } i \text{ 个对系统属性有贡献的因子}\}$,其标准值 $G(R_i) = g_i$.则系统的总标准值等于 n 个因素标准值的和,即:

$$G_{\text{并联}} = G(R_1 \cup R_2 \cdots R_n) = G(\bigcup_{i=1}^n R_i) = \sum_{i=1}^n g_i \tag{2}$$

(3)混联系统 复杂系统可分解成串联系统和并联系统的复合.由 n 个因子混合组成的系统的趋势或可能性标准值,等于 n 个因子对系统标准值按照串联、并联和相应的逻辑关系进行运算的标准值总和.如图 1 所示的系统,可以看作是 2 个系统的并联,其标准值等价系统如图 2 所示.

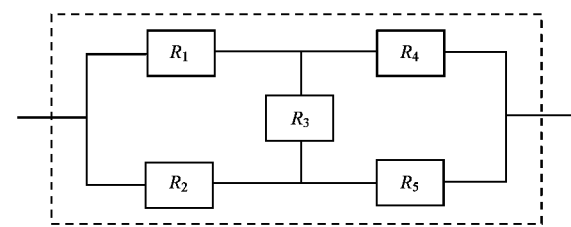


图 1 混联系统之一
Fig.1 One of mix system

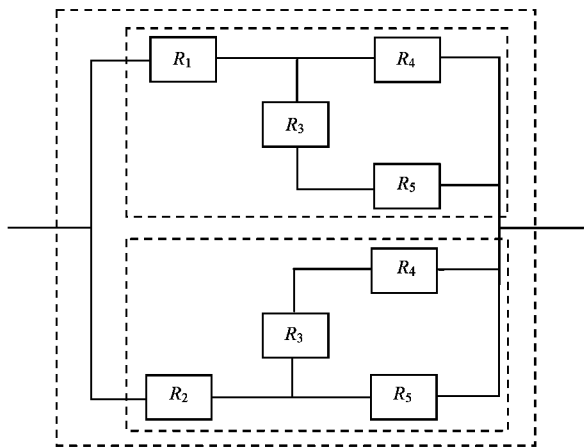


图 2 从系统标准值上与图 1 等价的混联系统
Fig.2 Equivalent system in normative index of the mix system in Fig.1

记因子 $R_i = \{ \text{第 } i \text{ 个对系统属性有贡献的因}$

子}, 其标准值 $G(R_i) = g_i$. 则系统的总标准值等于这几个因子标准值按照对系统贡献的逻辑关系进行运算的总和, 即:

$$G_{\text{混联}} = G((R_1 \cap (R_4 \cup (R_3 \cap R_5))) \cup (R_2 \cap (R_5 \cup (R_3 \cap R_4))))$$
$$= g_1 \times (g_4 + g_3 \times g_5) + g_2 \times (g_5 + g_3 \times g_4)$$

(3)

2 系统多因子指数集成评价方法

2.1 评价流程

系统多因子指数集成评价方法, 是在计算一个系统某种趋势或者可能性的过程中, 考虑系统内各个组成元素基准面选择不同, 从而对系统这种趋势或者可能性产生影响, 且呈一定的贡献结构的情况下, 所采用的一种结合概率论、图论、系统学、控制论及其他相关专业理论进行系统属性评价的方法. 系统多因子指数集成评价法, 是将影响评价对象某种趋势或者可能性的所有因素的组合作为一个具有一定结构特征的系统考虑, 通过求出系统某属性的总标准值, 按照某类系统属性的标准值分级, 判定该系统在某种属性上是否优劣的过程. 其评价流程图如图 3 所示.

2.2 系统分析

系统的多因子指数集成评价法在评价一个系统

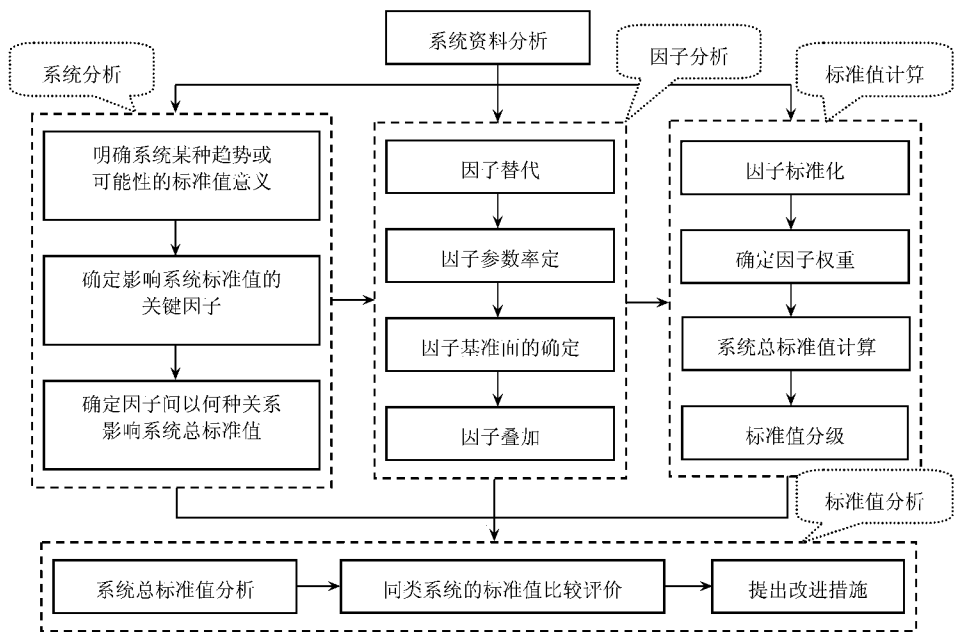


图 3 系统的多因子指数集成评价法流程

Fig.3 Flowchart of evaluation using system normative indexes integration method

的某种趋势或者可能性时,首先应对评价对象进行系统分析.系统分析的目的是找出影响系统某种趋势或者可能性的所有影响因素,并对这些因素对系统某种趋势或者可能性贡献进行关联分析或正交分析.

(1)明确评价对象的趋势或者可能性的意义 首先明确一个系统的哪种趋势或者可能性需要评价,这种趋势或者可能性的意义是什么.然后以这种趋势或者可能性为中心进行系统分析,找出影响这种趋势或可能性的所有可能因子.

(2)确定关键因子 可以利用层次分析法、主成份分析法、回归法、系统解释结构模型或其他系统方法,按照各个因子对系统趋势或可能性的影响程度确定出各级因子,直至确定出关键因子为止,剔除无关因子和极次要因子,并对这些因子的相互关系进行逻辑分析.

(3)确定因子关系 按照各个因子对系统标准值贡献的内在逻辑,对这些因子进行关系分析,如确定串联关系、并联关系、混联关系,画出这些因子对系统标准值的贡献关系逻辑图.并对混联系统的标准值贡献图进一步逻辑分析,做出其便于计算标准值的等价图.

(4)建立系统标准值计算公式 因子关系确定后,根据标准值的串联、并联、混联运算方法,可以建立系统标准值计算公式.

2.3 因子分析

(1)因子替代 对系统影响的主要因子确定后,应根据因子定量的可操作性作进一步分析,对那些难以定量的因子,采取类似的易定量因子予以替代.类似因子选择时应注意其相互间的相关性,对正相关因子,替代方法有多种,可直接替代,或乘以其相关系数,也可以用其相互间函数关系式替代;对负相关因子,采取因子替代后,在系统运算时应注意取替代因子值的倒数.

(2)因子参数率定和因子基准面确定 不同系统某种属性的差异来源于系统内各个因子取值的不同,所以系统内各个因子的取值应切实按照系统的本身特征取值,实际工作中应按照所收集到的系统的资料,客观准确地取值.为便于比较同类系统的某种属性,同类系统内相同因子的基准值应该相同,把系统内因子在取基准值时的状态称之为因子的基准面.基准值相当于对某种状态进行比较时的标准值.

(3)因子叠加 对过于庞大复杂的系统进行某种属性评价时,因为因子数量过多,因子间关系过于

复杂,此时应把系统划分为各个子系统的组合,可以按因子标准值混联计算的法则先在子系统水平上进行叠加计算.

2.4 标准值计算

(1)因子标准值的计算 本研究提出的因子标准值,指对系统总体趋势或可能性属性有贡献的各个因子的值 A_i 与其基准面的值 A_0 的比值.因为系统因子的属性在分布上往往是凹凸不平的、非均匀的,所以应将因子的某种属性在线、面、体或抽象体上按像元展开,不同的像元使用不同的因子属性值,求和后再与其基准值(同理,因子基准值也要在其相应的基准线、面、体或抽象体上按像元展开,但基准值有时是均匀分布的)相比.假设 A_i 因子在面上展开的第 j 个像元的值为 a_{ij} ,第 j 个像元面积为 S_{ij} ;其基准面积为 S_{i0} ,基准值为 a_{i0} ,则该因子的标准值 $G(A_i)$ 可用公式(4)计算其值(假设基准面均匀分布).因子标准值还可以根据因子属性和计算精度,不断地再分下去,直到计算出满足需要的值为止,如进行多元多重积分求值:

$$G(A_i) = \frac{A_i}{A_{i0}} = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} S_{ij}}{a_{i0} S_{i0}} \quad (4)$$

(2)确定因子标准值的权重 因子标准值的权重是指,对不同因子按其对系统属性的重要性程度,赋以调节系数.一个系统所有因子的调节系数总和应为 1.有多种方法可以为各个因子赋以权重值,如专家判断法、公众参与法、比例系数法、按属性打分法、敏感分析法等等.

(3)系统标准值的计算 整个系统某种属性的标准值,可以按系统分析过程中确定的混联关系框图和其计算公式进行因子标准值混联计算.如因子串联按标准值相乘关系、并联按标准值相加关系、混联按标准值的混合运算关系相应计算.

(4)标准值分级 标准值分级类似于层次分析法中的结果分级.主要是将同类系统的某种趋势和可能性的标准值,按照隶属度函数进行分级.实际操作中,隶属度的确定往往要与评价目的、评价范围相结合来进行确定.

2.5 系统标准值分析

(1)系统标准值结果分析 通过比较所要评价的系统的总标准值与该类系统的标准值分级区间,即可以判断该系统的某种趋势或可能性的大小.

(2)与其他同类型系统标准值的比较分析 也可以通过多个同类系统间的某种趋势或可能性标准

值的比较得出最优系统,为管理和决策提供科学依据.

3 泸沽湖流域面源污染流失的风险标准值估算

3.1 研究区概况

泸沽湖流域位于我国川、滇交界处,分属四川省盐源县和云南省宁蒗县,地理位置在27°36'55"~27°47'2"N,100°43'36"~100°54'20"E之间.该湖属金沙江水系,是由断层陷落而形成的高原淡水湖泊,形状如马蹄状,湖盆四周群山环抱,平均高出湖面近1 km.湖面海拔2 690.8 m,东西宽约5.2 km,南北长约9.5 km,湖岸线长约44 km,湖面面积50.1 km²,蓄水量为22.52亿 m³.泸沽湖是居长白山天池和玉溪抚仙湖之后的我国第三深淡水湖泊,最大水深93.5 m,水深超过50 m的湖面占一半以上,平均水深42 m.湖水水质达国家地面水Ⅰ类标准,最大透明度为12 m.由于其独特的地理位置及该地区相对滞后的经济发展水平,成为中国境内为数不多的未受严重污染的清洁湖泊.然而随着人口增加和旅游业的发展,泸沽湖流域中许多环境污染问题也在逐渐产生,很多问题已经引起多方关注,如土壤侵蚀、面源污染等问题.

3.2 流域面源污染流失的标准值风险的结构识别

把一个流域发生面源污染当作一个系统进行考察.影响全流域面源污染发生的因素较多^[23],水土流失是面源污染的载体,也是其污染形式.水土流失主要与坡度、坡长、坡向、土壤组成、化学性质、流域耕作方式、水土保持程度、植被类型、组成、降雨频度、强度、农田浇灌方式等因素有关.综合上述因子后,主要因子有以下几个:坡度坡长因子 SL 、土壤侵蚀因子 K 、作物管理因子 C 、水土保持因子 P 、降雨量及径流因子 R .分析各因子对水土流失风险的贡献影响关系,如降雨-径流过程是造成非点源污染物输出的源动力^[24],其他因子并联后与降雨径流因子串联,共同对流域面源污染的风险贡献标准值(图4所示).流域面源污染流失的风险标准值计算如公式(5)所示.

$$G_{\text{流失风险}} = G(R \cap (SL \cup K \cup C \cup P))$$
$$= g_R \times (g_{SL} + g_K + g_C + g_P) \quad (5)$$

3.3 影响污染流失的因子率定

(1)降雨和径流因子 R 引起的标准值风险 g_R 值估算 降雨侵蚀因子 R 值与降雨量、降雨强度、历时、雨滴的大小以及雨滴下降速度有关,它反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力.尺度较大的流域,应考

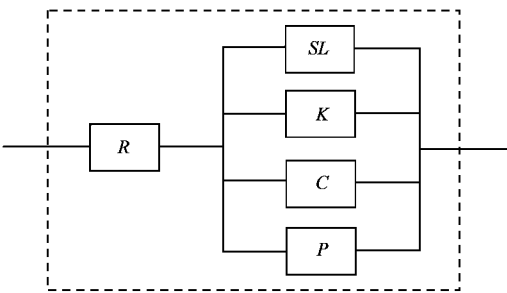


图4 流域面源污染流失风险标准值系统
Fig.4 Normative risk system of non-point source pollution loss to surface water

虑有关气象站点多年数据在流域表面上的分布,在ArcGIS中可采用一定的插值方法处理.本研究在流域内选择了基本能覆盖流域范围的宁蒗彝族自治县气象站34a的逐月降雨数据(如图5所示),在泸沽湖流域上没有获得别的气象站的数据,近似认为降雨量没有分布性,不进行插值.定义此处 R 因子引起的面源污染流失标准值风险 g_R 为某一保证率下产流量与总降雨量(雨季降雨量)之比. R 值引起的面源污染流失风险标准值的基准面为年降雨总量.

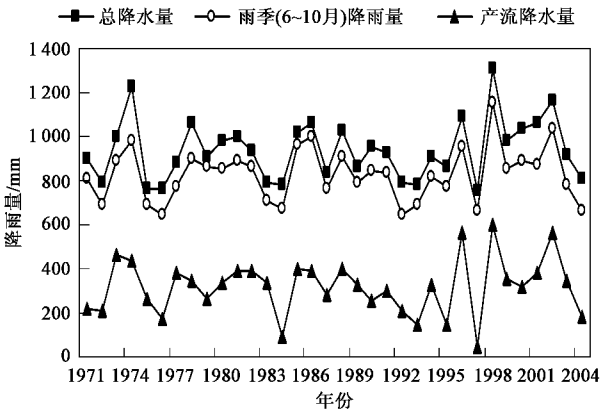


图5 泸沽湖流域多年降雨数据
Fig.5 Data of precipitation in Lugu Lake Watershed from 1971 to 2004

(2)坡度坡长因子 SL 引起的标准值风险值 g_{SL} 估算 地形因子对流域面源污染流失趋势的贡献此处用坡度坡长因子(流域表面积)的贡献代替.对流域数字高程模型[DEM,在国家基础地理信息中心1995年电子版1:25万、等高线间距100 m数据基础上生成,见图6(a)],利用ArcGIS进行3D分析,提取坡度坡长图,求出表面积.此处定义坡度坡长因子引起污染流失风险的标准值风险 g_{SL} 为流域表面积与其投影面积之比.

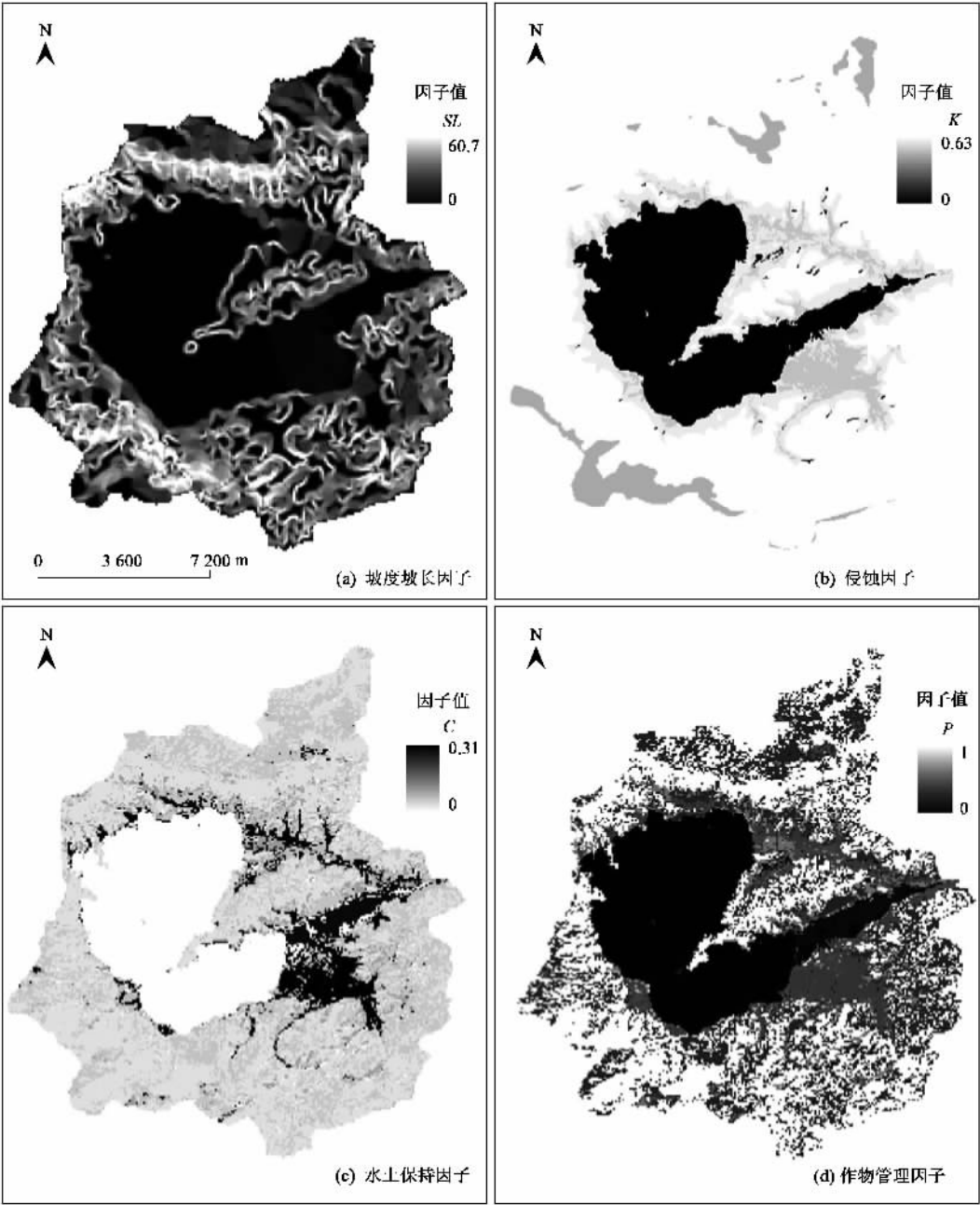


图 6 影响流域面源污染流失风险的因子值栅格图

Fig.6 Grid figure of the watershed factors related to non-point source pollution loss

(3)土壤可蚀性因子 K 引起的标准值风险值 g_k 估算 该因子反映土壤对侵蚀的敏感性,其值的大小与土壤质地、土壤有机质含量有较高的相关性^[25].根据丽江第二次土壤普查成果^[26]和 2005 年实地布点土壤采样分析,获得泸沽湖流域各类土壤的质地和有机质含量,查找 Wischmeier 等建立的土壤可蚀性值诺谟图^[22],通过克里格插值法,近似确定出流域不同土壤类型的可蚀性因子值(如表 1),以土类为成图

单元,生成 K 值分布图,并栅格化(栅格采用 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ ^[27]),做 3D 分析[如图 6(b)].定义可蚀因子引起的标准值风险值 g_k ,为流域各土壤类型面积与 K 值之积,除以流域面积与 K 的基准值积的比. K 的基准面取其中值 0.52 为比较基准值.

(4)水土保持措施 P 引起的标准值风险值 g_p 估算 水土保持措施因子 P 是采用专门防治土壤侵蚀措施后的土壤流失量与顺坡种植时的土壤流失量的比值,常用措施有等高耕作、修梯田等.由于没

有设小区实验,主要参照文献[25,28~31]进行 P 值的率定(见表2).将土地利用图与 P 值属性库文件记录项建立连接,得到 P 值因子图,并将其栅格化做3D分析[如图6(c)].土地利用图是根据2005-01-06 Landsat-5和Landsat-7多光谱波段TM卫片(分辨率为 $30\text{m}\times 30\text{m}$)进行解译调绘而成的^[32].定义 P 因子引起的标准值风险值 g_P ,为流域各土壤类型面积与 P 值之积,除以流域面积与 P 的基准值积的比. P 的基准面取 P 的中值0.50为比较基准值.

表1 采样点土壤可蚀因子 K 值

Table 1 Soil erosion factor value in sampling area				
采样点类型	容重/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	土壤质地	SOM ¹⁾ / $\%$	K
灌木	1.19	粉砂质壤土	1.04	1.04
水稻	1.34	壤质粘土	2.46	0.49
玉米	1.44	粘壤土	2.51	0.53
大豆	1.45	壤质粘土	2.7	0.49
草地1	1.42	砂质壤土	4.35	0.42
草地2	1.45	粉砂质壤土	1.49	0.98
草地3	1.32	粉砂质壤土	5.35	0.70
草地4	1.27	壤质粘土	1.36	0.54
草地5	1.31	粉砂质壤土	2.55	0.89
林地1	1.16	粘壤土	4.83	0.45
林地2	1.38	粉砂质粘土	1.78	0.52
林地3	1.23	壤质粘土	4.49	0.40
林地4	1.29	粉砂质壤土	2.12	0.93
林地5	0.50	粉砂质壤土	4.27	0.70
林地6	0.78	粉砂质粘壤土	4.37	0.56
林地7	1.20	壤质粘土	3.89	0.44
林地8	1.06	粘壤土	3.23	0.50
林地9	1.16	壤土	2.73	0.72

1)指土壤有机质含量

表2 泸沽湖流域 P 因子和 C 因子

Table 2 P factor and C factor value of Lugu Lake Watershed			
土地利用类型	P 因子	冠层类型	C 因子
林地	1	无冠层(水体、裸地、人居等)	0
人居	0.8		
草地	0.6	无明显冠层(水田)	0.18
果园	0.4	无明显冠层(旱地)	0.31
旱地	0.35	灌丛	0.035
灌丛	0.2	草地	0.06
水田	0.01	果园	0.04
水生	0	林地	0.017

(5)作物经营管理因子 C 引起的标准值风险值 g_C 估算 C 因子反映的是所有关覆盖和管理变量对土壤侵蚀的综合作用,其值大小取决于具体的作物覆盖、轮作顺序及管理措施的综合作用等.根据文献[25,28~31],借助细化的土地利用图^[32],获得流

域不同土地覆盖下的 C 值(表2).在土地利用分布图的基础上,生成 C 值因子图,并栅格化做3D分析[如图6(d)].定义 C 因子引起的标准值风险值 g_C ,为流域各土壤类型面积与 C 值之积,除以流域面积与 C 的基准值积的比. C 的基准面取 C 的中值0.16为比较基准值.

3.4 流域面源污染流失风险标准值计算结果

依据上述因子图即可在 ArcGIS 中计算出各因子对流域面源污染流失风险标准值分别为: g_{SL} 为1.21、 g_K 为0.89、 g_C 为0.99、 g_P 为0.26、 g_R 为0.33.此处,各因子标准值权重系数为等比例系数(即假设不设权重).根据公式(5)可以计算出泸沽湖全流域面源污染流失风险标准值为2.99.

通过建立标准值分级区间可以评定流域的水土流失引起的面源污染风险,按评价结果隶属度函数取值分级的方法,假如标准值在 $[0,1.5]$ 区间为Ⅰ级流失风险、在 $(1.5,2.5]$ 区间为Ⅱ级流失风险、在 $(2.5,3.5]$ 区间为Ⅲ级流失风险、在 $(3.5,5.0]$ 区间为Ⅳ级流失风险、在 $(5.0,\infty)$ 区间为Ⅴ级流失风险.级数越高发生面源污染流失风险越高.可知泸沽湖流域面源污染流失风险状态为Ⅲ级,处于中偏高流失风险状态.这一结果提示决策者,该流域面源污染流失问题应为该流域开展各类人类开发活动中所要充分考虑的问题之一.

4 结论

(1)使用标准值评价法,只要基准面选择统一,所有流域的水土流失风险均可进行比较,这样使多个不同尺度的流域的某种属性相比具有一定的可操作性,更重要的是避免了不同因子对系统水土流失风险贡献率的无序性.

(2)系统的多因子指数集成评价方法的建立可以在评价系统某种趋势或可能性时,合理解决因子对系统属性贡献有结构性问题,便于科学地评价系统某种属性.该评价法的建立,完善了系统评价的理论体系,对深化系统方法论具有一定的意义.系统多因子指数集成评价法可以和别的方法相结合,如与系统结构解释模型、层次分析法、主成分分析法、线性回归法、运筹学等方法结合,有助于对系统属性进行有效地综合地评价.

(3)系统标准值法在评价类似系统时均具有较强的适用性.可以将区域可持续发展的程度、生态系统稳定性、水体的污染程度、城市环境质量、城市面源污染控制程度、国民经济体系、区域或国家社会福

利体系等作为系统纳入国家考评体系.该方法在对同类系统间进行比较方面,具有较大的优势.

参考文献:

- [1] He C, Riggs J F, Kang Y T. Integration of geographic information systems and a computer model to evaluate impacts of agricultural runoff on water quality [J]. *Water Resource Bulletin*, 1993, **29** (6): 891-900.
- [2] Young R A, Onstad C A, Bosch D D, *et al.* AGNPS: a non-point source pollution model for evaluating agriculture watersheds [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1989, **44**(2): 168-173.
- [3] Generating Climate Data for AnnAGNPS[EB/OL]. <http://msa.ars.usda.gov/ms/oxford/nsi/agnps/DataPrep/Weather/Climate/Document/AGNPS2001/Climate.pdf>, 2001.
- [4] Beasley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for watershed planning [J]. *Transactions of the ASAE*, 1980, **23**: 938-944.
- [5] Abbott M B, Bathurst J C, Cung J A, *et al.* Introduction to the European hydrological system-systeme hydrologique European, "SHE", I: History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system [J]. *Journal of Hydrology*, 1986, **87**(1-2): 45-59.
- [6] David C A. US Army Corps of Engineers. Storage, treatment, over-flow, runoff model, STORM user's manual [R]. Hydraulic Engineering Center, U S, 1997. 170.
- [7] Arnold J G, Allen P M, Bernhardt G A. Comprehensive surface-ground-water flow model [J]. *Journal of Hydrology*, 1993, **142**: 47-69.
- [8] Hubber W C, Heaney J P, Nix S J. Storm water management model, use's manual version [R]. Department of Environmental Engineering and Science, University of Florida, F L, 1981. 569.
- [9] Williams R D, Nicks A D. A modeling approach to evaluate best management practices [J]. *Water Science and Technology*, 1993, **28**: 675-678.
- [10] Caruso B S. Risk-based targeting of diffuse contaminant sources at variable spatial scales in a New Zealand high country catchment [J]. *Journal of Environmental Management*, 2001, **63**(3): 249-268.
- [11] Sivertun H, Prange L. Non-point source critical area analysis in the Gissel watershed using GIS [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2003, **18**(10): 887-898.
- [12] Renschler C S, Mannaerts C, Dieckkruger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain [J]. *Catena*, 1999, **34**: 209-225.
- [13] Wickham J D, Wade T G. Watershed level risk assessment of nitrogen and phosphorus export [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2002, **37**: 15-24.
- [14] 陈能汪,洪华生,张璐平.流域尺度氮流失的环境风险评价[J]. *环境科学研究*, 2006, **19**(1): 10-14.
- [15] Lloyd D K, Lipow M. Reliability: management, methods, and mathematics[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1962. 291-299.
- [16] Khan F I, Husain T. Risk assessment and safety evaluation using probabilistic fault tree analysis [J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2001, **7**(7): 1909-1927.
- [17] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process [J]. *European Journal of Operational Research*, 1990, **48**: 9-26.
- [18] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.84-92.
- [19] 张跃,邹寿平,宿芬.模糊数学方法及其应用[M].北京:煤炭工业出版社,1992.146-212.
- [20] 龚光鲁.概率论与数理统计[M].北京:清华大学出版社,2006.167-187.
- [21] 汪应洛.系统工程理论、方法与应用[M].北京:高等教育出版社,1998.144-176.
- [22] Wishmeier W H. A soil erodibility nomograph farm land and construction sites [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1971, **26**: 189-193.
- [23] 贺缠生,傅伯杰,陈利顶.非点源污染的管理及控制[J]. *环境科学*, 1998, **19**(5): 87-91.
- [24] 黄金良,洪华生,张璐平,等.基于 GIS 的九龙江流域农业非点源污染氮磷负荷估算研究[J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(5): 866-871.
- [25] 游松材,李文卿. GIS 支持下的土壤侵蚀量估算[J]. *自然资源学报*, 1999, **14**(1): 62-68.
- [26] 云南省土壤普查办公室.云南省第二次土壤普查地州级资料 02 号[R]. 1984. 35-175.
- [27] Dong R C, Dong J J, WU G, *et al.* Optimization of post-classification processing of high-resolution satellite image: a case study [J]. *Science In China: Series E Technological Sciences*, 2006, **49**(s1): 98-107.
- [28] 黄金良,洪华生,张璐平,等.基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. *水土保持学报*, 2004, **18**(5): 75-79.
- [29] 孙峰. 基于 GIS 的官厅水库流域非点源污染负荷计算研究[D].北京:北京师范大学,2002.30-55.
- [30] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 和地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. *水土保持学报*, 2000, **14**(2): 19-24.
- [31] 张岩,袁建平,刘宝元.土壤侵蚀预测模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. *应用生态学报*, 2002, **13**: 1033-1036.
- [32] 董仁才.区域生态系统变化的空间特征研究[D].北京:中国科学院研究生院,2006.43-64.