

基于变异系数法的北京市山区小流域生态环境质量评价

刘 轩,岳德鹏*,马梦超

(北京林业大学 省部共建森林资源培育与保护教育部重点实验室,北京 100083)

摘 要:以北京市山区小流域为研究对象,综合考虑自然环境、生态健康、人类活动等因素的影响,构建了北京市山区小流域系统的生态环境质量评价模型。采用变异系数法,以小流域为评价尺度,对北京市山区的房山、平谷、密云、昌平、怀柔、延庆、门头沟 7 个区县 551 条小流域的生态环境质量进行定量评价。结果表明,北京市山区小流域整体生态环境质量良,综合指数 6.83,各区县间生态环境质量差异不大,以密云县生态环境质量最优,其余 6 区县生态环境质量较好。使用变异系数法进行评价的结果与现状基本相符,说明该研究方法具有科学性、可行性,能用于区域生态环境质量研究。

关键词:北京市山区;小流域;生态环境质量;变异系数法;评价模型

中图分类号:X821 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)02-0066-06

Small Watershed Eco-environmental Quality Appraisal of Beijing Mountain Area Based on Coefficient Variation

LIU Xuan, YUE De-peng*, MA Meng-chao

(Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Education Ministry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Regarding the small watershed of the mountainous region in Beijing as the research object, considering the nature environment, ecology health, human activity and other effects synthetically, an evaluation model of ecological and environmental quality of small watershed system in Beijing mountain region was established. Variation coefficient method with high accuracy and strong objectiveness was adopted to quantitatively evaluate ecological and environmental quality of Beijing Mountainous region, including 551 small watersheds in seven districts, such as Fangshan, Pinggu, Miyun, Changping, Huairou, Yanqing, and Mentougou. It showed that the ecological environmental quality in Beijing mountainous region generally was good, with the comprehensive index of 6.83, and the environmental quality variations among districts were small. The ecological environmental quality in Miyun was the best. Those of the rest six districts were within the level of good. The result measured by coefficient of variation method was roughly in line with actual situation, indicating the scientificity and feasibility of the method, which could be used to study regional eco-environmental quality.

Key words: mountainous region in Beijing; small watershed; eco-environment quality; coefficient of variation method; evaluation model

生态环境质量是 20 世纪 80 年代发展起来的生态学研究热点,它反映着一个地区生态环境对人类生存及社会经济持续发展的适宜程度。正确的生态环境质量评价,可以为区域生态环境状况做出科学

收稿日期:2015-04-21 修回日期:2015-05-13
基金项目:国家自然科学基金项目(41371189)。
作者简介:刘 轩,男,在读硕士,研究方向:3S 在景观生态学中的应用。E-mail:sun648140951@163.com
* 通信作者:岳德鹏,男,教授,研究方向:景观生态学。E-mail:yuedepeng@126.com

的评估,从而为生态环境的保护、自然资源的开采利用以及可持续发展规划提供重要参考^[1]。

北京市山区面积为 1.04 万 km², 占全市总面积的 62%^[2]。作为北京市主要的生态涵养发展区,山区不仅为北京提供生态安全屏障,支撑着北京的可持续发展,同时还起到涵养水源、除尘滤污、净化空气等作用。如何对山区生态环境质量进行评价,人们做了大量的研究^[3-5],一般采用的研究方法主要包括层次分析法、Delphi 法、因子分析权数法、离差及均方差法等。但对于生态环境系统这样一个包含多个因子,而各个因子之间又互相影响的复杂系统,多数方法在进行评价时都表现出一定局限性,无法准确的反映出实际情况。因此,试图将变异系数法引入评价模型系统中,通过反映不同小流域之间因子的细微差异,根据差异大小客观的对评价指标赋权,并对北京市山区小流域的生态环境质量状况予以评价,旨在为北京生态环境的规划、管理及建设提供给科学的依据。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

研究区设在北京市西北部的山区,居 115°24′—117°30′E、39°30′—41°05′N 之间,所跨区域有怀柔、昌平、延庆、密云、门头沟、平谷、房山七区县,共包含小流域 550 条,总面积 9 132.05 km²;地形地貌复杂多样,总体特征是山高、坡陡、谷深,区内的平均坡度为 25.90°,平均海拔为 478.84 m;流域内气候干旱少雨,降雨时间主要集中分布在 6—8 月份,多年平均降雨量仅为 410 mm,属于旱、半干旱大陆性季风气候。作为我国的政治、经济、文化中心,伴随着经济的高速增长,其生态环境问题日益突出,严重的影响了社会经济的可持续发展。

1.2 数据来源

选取了 2012 年 6 月 Landsat ETM 遥感影像(30 m×30 m)及同时相、同分辨率的 TM 影像,用于植被类型、植被覆盖度、高程、坡度等信息的提取。并收集大量非遥感数据作为辅助性资料,如:北京市 1:10 万地形图、行政区划图以及公报、近年来北京市统计年鉴、2012 年气象数据、2010 年北京乡镇边界图以及地面实测数据等。

2 评价方法

2.1 评价指标体系的建立

生态环境质量的评价不仅对社会经济进步具有一定影响,而且对生态环境和资源的合理开发利用有着重要的参考价值。建立出一套能综合反映出生态环境质量状况的指标体系是一项复杂的工作,不仅需要反复的试验分析和计算,更要求选取的评价标准和评价项目非常准确。在建立山区小流域生态环境指标体系时,不仅要考虑到山区生态环境的涵义,更要遵循其特点和规律,确定适合当地特色的指标体系框架。对山区生态环境产生影响的因素主要有自然环境和人类活动两大方面,其中,自然环境总体质量指标包括气候和土壤类型、水土流失程度、植物覆盖度等,而与人类活动相关的指标则有化肥使用、土地利用、景观破碎状况等。

综合考虑北京山区小流域的整体特征,遵循系统的科学性、代表性、可操作性、适用性等原则^[6],将北京山区小流域评价指标体系分解为自然条件制约因子、流域生态健康因子和人类活动影响因子 3 个要素。其中,前 2 个要素用来反映北京山区小流域的自然结构的稳定性,而最后 1 个指标则反映了人类活动对生态环境的影响状况。以此为基础建立北京市山区小流域的生态环境评价指标体系。

表 1 北京市山区小流域生态环境质量评价指标体系

Table 1 System of small watershed eco-environmental quality index appraisal in Beijing mountainous area

目标层	准则层	因素层	指标层	权重
小流域生态环境健康	自然条件	地形地貌	坡度因子	0.04
			海拔高度	0.06
		气候土壤	年平均降水	0.05
			土壤可蚀性 K 值	0.04
			NDVI	0.17
	生态健康	林草覆盖	森林(乔木+灌木)覆被率	0.17
		生物保护	景观多样性指数	0.15
			景观连通性指数	0.09
		景观利用	景观破碎度	0.05
			裸露地面面积比重	0.05
	人类活动	污染负荷	COD	0.06
			化肥施用强度	0.07

2.2 单项指标的获取与计算

本指标系统中,通过资料查询以及简单的gis操作、分析与统计,能获取小流域的坡度、海拔及年降水量、化肥施用情况等指标的信息。而另外部分指标,其涵义及计算公式如下:

2.2.1 土壤可蚀性K值指标 土壤可蚀性K值反映小流域中土壤被冲蚀的情况^[7],K值越大,则流域内土壤结构越稳定,难以被冲蚀;反则反之。它作为定量研究土壤侵蚀情况的基础,其计算公式如下:

$$K=7.594\times\left(0.0034+0.0405\exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(\log D_g+1.659)}{0.7101}\right]^2\right\}\right);$$
$$D_g=\exp(0.01\sum f_k\ln m_k)$$

(1)

式中: D_g 土壤颗粒平均几何直径, m_k 是第 k 级粒径下组分限制的平均值, f_k 是第 k 级粒径组分的质量百分比。

2.2.2 NDVI 指数 是小流域中用来监测植被变化、植被生长状态以及估算植被覆盖度研究中常用的植被指数,其数值越高,表明植被盖度越高、长势越好。计算公式: $NDVI=\frac{NIR-R}{NIR+R}$,式中: NIR 为近红外波段($0.7\sim1.1\mu m$), R 为红波段($0.4\sim0.7\mu m$)。

2.2.3 景观多样性指数 景观多样性指数是反映小流域生态环境系统中景观元素的丰富度和复杂度指标。其值越大,表明景观越丰富。计算公式:

$$H=-\sum(P_i)\log_2(P_i)$$

(2)

式中: P_i 是 i 种景观类型占总面积的比。

2.2.4 景观连通性指数 景观连通性反映的是不同类型的景观在小流域生态环境系统中的连接程度。值越大,表明景观连通性越好。计算公式:

$$I=\frac{\sum_{i=1}^{T_2}\sum_{j=1}^{T_2}\frac{\theta_i-\theta_j}{1+nl_{ij}}}{A_L^2}$$

(3)

式中: n 表示景观中绿地斑块总数, B_i 和 B_j 分别表示绿地斑块 i 和斑块 j 的面积, nl_{ij} 表示斑块 i 和斑块 j 之间的连接数, A_L 是研究区的面积。

2.2.5 景观破碎度指数^[8] 景观破碎度反映了小流域中景观被分割的破碎情况,景观破碎度大对生态环境具有一定的不利影响。

$$\text{计算公式: } C_i=N_i/A_i$$

(4)

式中: C_i 为景观 i 的破碎度, N_i 为景观 i 的斑块数, A_i 为景观 i 的总面积。

2.2.6 COD 指数 化学需氧量(COD)是通过测定水中还原性物质的多少来衡量水体被污染情况的指标,COD 值越大,表明水体受污染越严重。采用重

铬酸钾法测定^[9-10]。

2.3 指标权重确定

指标权重的确定是进行系统多指标综合评价中最重要的一步,直接影响着综合评价的结果^[11]。考虑到研究对象间的地理位置接近,地形地貌等自然环境状况相似,所以研究区内特别是地理位置邻接的小流域之间指标数值差异并不大,为了突出数据间的微小差异,同时又减少评价过程中人为主观因素影响以及极值指标造成的试验误差,文章采用具有较高精度的变异系数法来确定权重。

变异系数法(coefficient of variation method)是一种客观的赋权方法。变异系数是统计学中的一种统计指标,常用于衡量数据之间的差异。它通过对数据的标准差与平均值进行求比来获得。变异系数越大的指标,其在评价对象中的分布变异性就越大,故用该项指标就能对各评价对象进行明确的区分,其在整个评价体系中应该赋予较大的权重;反之,则应赋予较小的权重^[12-13]。

由于指标的类型不同,其量级与量纲也存在差异,需要对评价指标进行数据的标准化、规范化处理。文章采用极值标准化法^[14-15]将原始数据无量纲化。

2.3.1 指标权重的计算 研究区域内共有 550 条小流域,用来评价的指标共有 12 个, X_{ij} 表示第 i 条小流域在第 j 个指标上的观测值, $i=1,2,3\cdots n$; $j=1,2,3\cdots m$, $n=550$, $m=12$ 。

计算指标权重 A_j :

$$A_j=\frac{V_j}{\sum_{j=1}^m V_j}$$

(5)

式中: V_j 为第 j 个指标的变异系数, $V_j=\frac{S_j}{P_j}$; S_j 为

每个指标的标准差, $S_j=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n(X_{ij}-P_j)^2}$; P_j

为每个指标的平均值, $P_j=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n X_{ij}$

由以上公式计算得出研究区小流域生态环境质量评价系统中各指标的综合权重(表 1)。

2.3.2 小流域生态环境质量状况计算 根据各个指数的权重值及其量化值,可计算出北京市山区每条小流域内生态环境质量评价的综合指数:

$$E_i=\sum_{j=1}^m B_{ij}\times A_j$$

(6)

式中: E_i 为各评价对象生态环境质量综合评价指数; B_{ij} 为第 i 条小流域第 j 个指标的标准量化值。

2.4 小流域生态环境质量评价分级

由计算得出小流域生态质量指数,根据前面确定的标准化处理原则,数值越大表示生态环境相对

越好。文章根据《生态环境状况评价技术规范(试行)》(HJ/T 192—2006)的分级标准,对环境质量综合评价指数进行分级,并对各个等级进行说明(表 2)。对照分级表对所有分析单元进行统计分级即可获得研究区的环境质量状况以及空间分布特征。

表 2 生态环境状况分级

Table 2 Grading table of ecological environmental conditions

等级	指数	状态
优	$\epsilon_i \geq 7.5$	自然环境状况好,土地利用结构非常合理,植被盖度高,景观破碎度很低,生态系统破坏少,生态系统自维持能力很强,小流域环境状况宜人
良	$5.5 \leq \epsilon_i < 7.5$	自然环境状况较好,土地利用结构比较合理,植被盖度较高,景观破碎度较低,偶尔存在生态系统破坏情况,生态系统比较稳定,但存在极少数限制小流域生态环境水平的因子
一般	$3.5 \leq \epsilon_i < 5.5$	自然环境状况一般,土地利用结构一般,植被盖度及景观破碎程度一般,生态系统基本能维持稳定,比较适合人类居住
较差	$2.0 \leq \epsilon_i < 3.5$	自然环境状况较差,土地利用结构不合理,植被盖度低,景观破碎程度高,生态系统基本无法维持稳定,环境的破坏严重,不适宜人类居住
极差	$\epsilon_i < 2.0$	自然环境状况极差,一般位于人迹罕至的沙漠、戈壁、盐碱地等条件艰苦的区域

3 结果与分析

以北京小流域生态环境质量评价体系及评价指标为基础,结合小流域生态环境质量分级标准,对 2012 年的北京市山区小流域生态环境质量进行了综合评价。利用 spss 及 Arcgis 等软件计算得出北京市山区七个区县的生态环境质量指数,并绘制出区内 551 条小流域的生态环境质量空间分布格局(图 1)。

3.1 北京市山区小流域生态环境质量空间分布格局

结合图 1、表 3,对 2012 年北京市山区 551 条小

流域的生态环境质量状况进行分析,在空间分布上,北京市山区整体的生态环境质量较好,其中生态环境质量在“优”、“良”等级的小流域共 404 条,占总数的 73.3%,这些小流域主要分布在受人类影响较小、自然保护工作到位的区域,如房山区北部的圣莲山风景区,周围有笛子港、上石堡、下石堡、南沟等小流域,其综合得分皆在 8.5 以上;又如昌平区南部的白羊沟至白虎涧一线,以及其北部的大杨山、十三陵附近,共 20 余个 小流域,评级皆在“良”以上,这些区域有几点共同的特征:林草覆盖度好,景观的破碎度小、多样性指数高等。

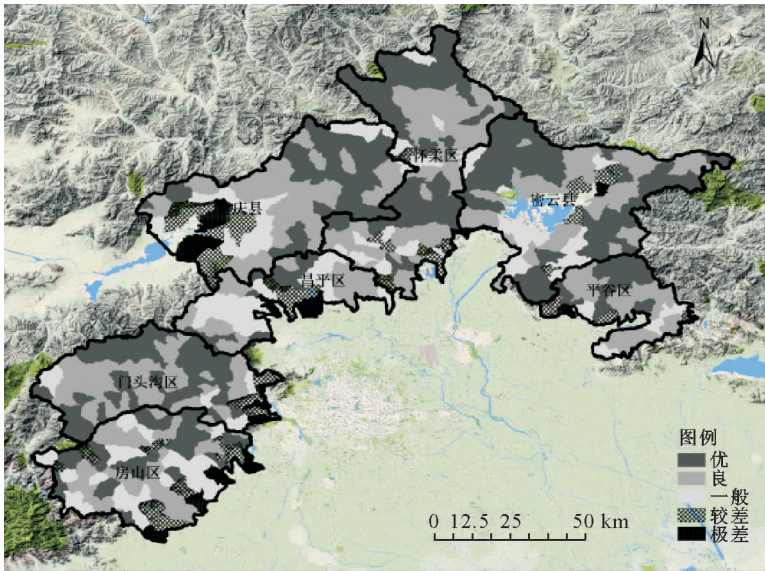


图 1 北京市山区小流域生态环境质量空间分布格局

Fig. 1 Spatial distribution pattern of small watershed eco-environmental quality in Beijing mountainous area

而生态环境质量得分为“差”和“极差”等级的小流域共 58 条,占总数的 10.5%。它们多分布在山区中夹杂的小块平原地及山前建筑密集区,如密云水库附近的大漕村、小漕村,延庆东南部的八里店、

黄柏寺、东桑园,房山、昌平南部的广禄庄、燕山和营坊、响潭小流域,等。这些小流域综合得分多在 2.0 以下,是整个研究区生态环境最差的区域。原因在于,这些山区中的平原区域,是适宜人类生产、生活

的场所,人类通过其活动进入自然界,并不断的对自然因素进行利用和改造,不可避免的对生态环境质量产生影响。居民点的密集分布,道路、建筑等人工设施的修建,造成地表裸露面积比重增加,破坏了当

地的景观生态格局。而农业生产活动中,耕地面积的不断扩大,农药、化肥的高度施用,使得该区域内生态环境污染严重。导致在小流域生态环境质量的综合计算中,这些区域内环境质量综合得分偏低。

表 3 各等级小流域条数分布

Table 3 Distribution of amount for each scale of small watersheds

等级	怀柔	昌平	密云	门头沟	平谷	延庆	房山	总体
优	13	22	42	36	46	12	28	199
良	16	27	44	38	37	16	27	205
中等	14	23	16	6	13	5	12	89
较差	3	9	5	3	6	4	7	37
极差	2	5	1	3	2	1	7	21
合计	48	86	108	86	104	38	81	551

3.2 区县之间生态环境质量比较

从表 4 可知,北京市山区 7 个区县的生态环境综合指数在 6.2~7.6 之间,平均值为 6.83,对比而言,各个区县之间生态环境质量的差异性较小,分布相对均衡。对照生态环境质量分级标准,结果表明,密云生态环境质量优,其他 6 个区县生态环境质量良,7 个区县综合水平为良。生态环境质量最佳的密云县,其综合指数达 7.53,而位于北京市西部的房山县,其综合指数仅 6.22,是研究区中生态环境质量最差的县区。原因可能是 2008 年房山被划分北京城市发展新区,城市建设初期人为扰动大,许多林地、耕地向建设用地转换,给当地环境带来一定的

压力。而生态环境质量最好的密云县,近年来不断发展生态环境建设,先后关闭了传统的“三高”企业,加强城镇绿地建设,积极培育高端低碳产业等举措,使 2 区县间的生态环境质量拉开差距。

从不同区县各个级别的小流域条数所占比重进行分析(图 2),其结果与根据生态环境综合指数法得出的分级结果基本保持一致。其中,密云生态环境质量最好,其级别为优的小流域所占比重为 44.2%,其次是门头沟,比重为 41.9%。整个研究区内,小流域生态环境质量等级以良为主,比重为 37.2%,与综合指数法结果一致。

表 4 环境综合指数得分

Table 4 Score of environmental comprehensive index

区县	昌平	房山	怀柔	门头沟	密云	平谷	延庆
得分	6.38	6.22	7.10	7.42	7.53	6.75	6.43

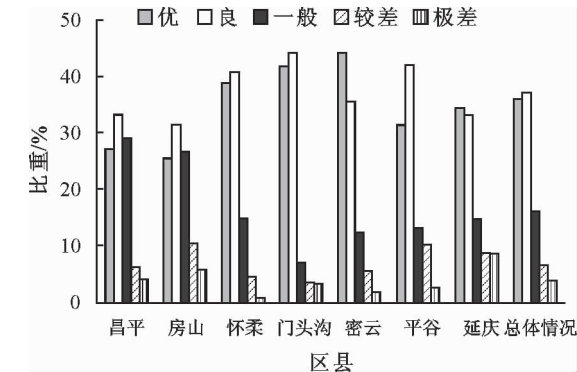


图 2 各区县不同等级小流域所占比重
Fig. 2 Percentages of each scale of small watersheds in each district and county

3.3 不同功能分区下生态环境质量分析

不同的自然条件与功能分区下,小流域的定位不同,发展方向不同,其地类结构、景观空间构成要素及生物物种多样性也存在较大的差异。选取了研究区内具有典型特征的 8 个小流域(表 5)进行研

究,结合其特点进而推论出不同功能分区下小流域生态环境特征及其限制性因子。

从表 5 可知,整体而言,生态环境质量最好的区域是自然保护区和旅游业发展区,该区域一般地处自然条件优良的深山区。受地理环境限制及国家政策保护,该区域极少的受到人类活动的影响。在良好自我调节能力的维持下,其生态系统始终保持相对稳定状态,生态健康水平极佳。如后喇叭沟、滴水壶小流域,综合得分分别为 9.54、8.06。与之相对的是受人类活动影响极大的区域,如城镇居住区及工业发展区,其地理位置大都位于山前平原区,生态环境水平一般处于中等以下,如中门寺沟、营坊,综合得分皆不到 4.0。原因在于人类对于景观的不合理利用,导致林草覆盖降低、生物保护不足,进而造成小流域自然结构的稳定性被削弱。农牧业发展区主要包括果园、蔬菜、粮食作物的种植及畜禽类养殖,其对环境的污染较轻,污染源主要是农药残留物

及畜禽粪便废弃物,成片农作物、果树种植,导致当地景观结构呈现单一,结合鱼子山小流域对该区进行分析,得到其限制性因子主要有景观多样性、COD 及化肥施用强度。生态修复区主要指致力于破坏的自然生态系统的恢复与重建工作,就北京山区而言,其内容包括对废弃矿山的修复与对风沙源的治理,它是一个与生态破坏对立的过程,其限制性因子主要有裸露地面面积比重与土壤可蚀性因子。

表 5 不同功能分区下典型小流域信息

Table 5 The information table of typical small watershed in the different functional areas					
名称	行政位置	面积/km²	功能分区	特点	综合评分
后喇叭沟	怀柔	44.32	森林自然保护区	位于北京市最大的天然林区,森林茂密、山地海拔落差大、气候垂直变化明显	9.54
滴水壶	延庆	15.07	旅游业发展区	与乌龙峡谷风景区毗邻,区内山势挺拔,溪水终年流淌,温度适宜,四季青草长生	8.06
中门寺沟	门头沟	11.39	城镇居住区	位于城乡结合部,区域内存在一定的大气、水体及噪声污染问题,景观结构单一	3.85
营坊	昌平	35.57	工业发展区	位于山前平原区,交通位置便利,南方临近多个工业园区	1.83
鱼子山	平谷	31.56	农牧业发展区	产业类型以粮食、果、菜和畜禽养殖为主,主要分布在平原及浅山山区	6.83
牛圈子	怀柔	15.47	生态修复区	产业结构单一,土地贫瘠,是京津风沙源重点治理区域	3.32
董各庄	密云	8.95	水源涵养区	密云水库附近,水质优良,是生态环境重点保护区域	7.49
大水峪	怀柔	58.78	地质灾害多发区	山体主要由火山岩构成,岩石较松软,易脱落,且沟谷较多,极易集水,是泥石流灾害高发区	5.92

综上所述,北京市山区具有自然环境状况较好,土地利用结构比较合理,植被盖度较高,景观破碎度较低等特征,但同时也存在着少数限制小流域生态环境水平的因子,这些限制性因子是制约北京市山区生态环境发展的重要因素。因此,在经济发展的同时,应重视限制性因子的消极影响,因地制宜,不断加大生态环境工作的开展与落实,力图达到经济与环境的协调发展。

4 结论

研究建立了北京市山区小流域生态环境质量的评价模型,以小流域为评价单位,采用变异系数法对研究区进行了分析。结果表明研究区 7 个区县生态环境质量属优良水平,其中密云生态环境质量最佳。研究得出的结果与北京市山区的实际情况较为吻合,说明该指标体系及计算方法在进行评价分析时能客观的反映出区域的生态环境质量水平,可为北京市小流域的综合治理和保护提供参考。

采用变异系数法分析在避免人为主观因素的干扰的同时,又能克服指标权重均衡化的缺陷,反映出数据之间的微小差异。在反映地理位置相邻、自然环境相近的区域的各自特征时具有一定的优势。

水源涵养区是受国家重点保护的区域,生态环境质量良好,但也存在轻微的生态污染问题,污染源主要为随降水、径流进入水体的各种面源污染物,其限制性因子主要是 COD。地质灾害区多位于坡陡、沟深的山区,形式主要有泥石流、滑坡等,其原因是连续高强度降水导致的土壤团粒结构破坏,从而出现土壤冲蚀现象。因此该类地区的生态环境限制性因子主要是年均降水、土壤可蚀性。

小流域生态环境质量评价的最终目的并不仅仅是确定小流域生态环境质量状态如何,而是要分析出影响小流域生态环境质量的主要因素,从而制定出针对性的对策,引导生态环境质量向好的方向发展。

参考文献:

[1] 滕明君,曾立雄,肖文发,等.长江三峡库区生态环境变化遥感研究进展[J].应用生态学报,2014,25(12):3683-3693.
TENG M J,ZENG L X,XIAO W F,*et al.* Research progress on remote sensing of ecological and environmental changes in the Three Gorges Reservoir Area,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology. Dec. ,2014,25(12):3683-3693. (in Chinese)
[2] 宋金平,彭萍.北京山区生态环境问题与建设思路[J].北京规划建设,2004(1):57-59.
[3] 李妍彬,田至美.北京山区小流域治理措施综述[J].环境科学与管理,2007,32(2):101-103,131.
[4] 宋秀杰,郑希伟.北京市生态环境现状及生态保护发展战略[J].自然生态保护,2001(3):30-33.
SONG X J,ZHENG X W. On situation and development strategy of ecology environment in Beijing[J]. Natural Ecology Conservation,2001(3):30-33. (in Chinese)
[5] 王瑶,宫辉力,李小娟.基于 GIS 的北京市生态环境质量监测与分析[J].国土资源遥感,2008(3):91-96.

320-326. (in Chinese)

[27] 曾光平,夏丽花,林祥明,等. 福州市空气污染浓度预报方法[J]. 气象,2000,26(4):25-29.

ZENG G P,XIA L H,LIN X M,*et al.* Forecast method of the density of atmospheric pollutant in Fuzhou City[J]. Meteorological Monthly,2000,26(4):25-29. (in Chinese)

[28] 王宏,林长城,蔡义勇,等. 福州市空气质量状况时空变化及其与天气系统关系[J]. 气象科技,2008,36(4):480-484.

WANG H,LIN C C,CAI Y Y,*et al.* Temporal and spatial distribution of air quality and its relationship with weather systems in Fuzhou[J]. Meteorological Science and Technology,2008,36(4):480-484. (in Chinese)

[29] 谢元贵,龙秀琴,刘济明,等. 采煤塌陷对百里杜鹃林区植物群落特征的影响[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2012,36:37-41.

XIE Y G, LONG X Q, LIU J M. Influences of coal mining collapse on characteristics of plant community of Hundred-mile Azalea Area of Guizhou[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Nat. Sci. Edi. ,2012,36:37-41. (in Chinese)

[30] 李素莉,杨军,马履一,等. 北京市交通干道防护林带内 PM_{2.5} 浓度变化特征[J]. 西北林学院学报,2015,30(3):245-252.

LI S L,YANG J,MA L Y,*et al.* Variations of PM_{2.5} concentrations inside the greenbelts along two urban traffic arteries in Beijing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015,30(3):245-252. (in Chinese)

[31] TALLIS M,TAYLOR G,SINNETT D,*et al.* Estimating the removal of atmospheric particulate pollution by the urban tree canopy of London, under current and future environments[J]. Landscape and Urban Planning,2011,103(2):129-138.

[32] 郑秋露,廖景平. 基于层次分析法的园林景观评价——以华南植物园龙洞琪林为例[J]. 西北林学院学报,2013,28(6):210-216.

ZHENG Q L, LIAO J P. Landscape evaluation based on AHP: a case study of Longdongqilin at South China Botanical Garden[J]. Journal of Northwest Forestry University,2013,28(6):210-216. (in Chinese)

[33] 齐津达,傅伟聪,李炜,等. 基于 GIS 与 SBE 法的旗山国家森林公园景观视觉评价[J]. 西北林学院学报,2015(2):245-250.

QI J D,FU W C,LI W,*et al.* Landscape visual evaluation of Qishan National Forest Park based on GIS and SBE method[J]. Journal of Northwest Forestry University,2015(2):245-250. (in Chinese)

(上接第 71 页)

[6] 蔡玉秋. 农业生态环境质量评价问题研究[J]. 生态经济,2013(2):174-177.

[7] 李炜民,谢军飞,李晓兵,等. 东灵山—百花山景区土壤侵蚀的安全评价[J]. 西北林学院学报,2007,22(4):62-65.

LI W M,XIE J F,LI X B,*et al.* Safety evaluation on soil erosion in Dongling-Baihua Mountainous Area[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(4):62-65. (in Chinese)

[8] 孟京辉,陆元昌,CHRISTOPH Kleinn,等. 基于遥感的景观格局时空动态研究[J]. 西北林学院学报,2010,25(1):207-211.

MENG J H,LU Y C,CHRISTOPH K,*et al.* Spatial and temporal dynamics of landscape based on remote sensing[J]. Journal of Northwest Forestry University,2010,25(1):207-211. (in Chinese)

[9] 温淑瑶,马占青,高晓飞,等. 重铬酸钾法测定 COD 存在问题及改进研究进展[J]. 实验技术与管理,2010,27(1):43-46,76.

[10] 陈丽. COD 的快速测定方法研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[11] 戴全厚,刘国彬,刘明义,等. 小流域生态经济系统可持续发展评价—以东北低山丘陵区黑牛河小流域为例[J]. 地理学报,2005,60(2):209-218.

DAI Q H,LIU G B,LIU M Y,*et al.* An evaluation on sustainable development of eco-economic system in small watershed in Hilly Area of Northeast China[J]. Acta Geographica Sinica,2005,60(2):209-218. (in Chinese)

[12] 孙凯. 鞠晓峰,李煜华. 基于变异系数法的企业孵化器运行绩效评价[J]. 哈尔滨理工大学学报,2007,12(3):165-167,172.

SUN K,JU X F,LI Y H. Performance evaluation of enterprise incubators based on variation coeddicient method[J]. Journal Harbin Univ. Sci. & Thch. ,2007,12(3):165-167,172. (in Chinese)

[13] 王芸. 基于变异系数权重的灰色关联投影法在水质评价中的应用[J]. 地下水,2010,32(2):61-63.

[14] 任德华,刘悦翠. 区域森林资源健康评价指标体系研究[J]. 西北林学院学报,2007,22(2):194-199.

REN D H,LIU Y C. A study on index system about health assessment of regional forest resources[J]. Journal of Northwest Forestry University,2007,22(2):194-199. (in Chinese)

[15] 贾凤梅,郭盛昌,柏金凤,等. 黑龙江省生态环境质量动态变化及建议[J]. 湖南农业科学,2014(4):60-62.