

基于土地利用/覆被变化的贵阳市红枫湖水源保护区生态风险演变

卢江林¹, 李阳兵²

(1. 暨南大学 大气环境安全与污染控制研究所, 广州 510632; 2. 贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵阳 550001)

摘要:以贵阳市饮用水源地红枫湖保护区为研究对象, 基于 1991 年, 2007 年, 2013 年 3 期 TM 遥感影像解译数据, 从生态风险评价的角度出发, 利用 ArcGIS, ERDAS IMAGINE 平台, 通过逐网格采样和空间克里金插值方法, 研究红枫湖保护区不同时间范围内的土地利用变化及区域景观生态风险演变。结果表明: 近 22 a 主要以中间等级生态风险为主, 1991—2007 年低生态风险、较低生态风险和中生态风险所占面积比例均下降。2007—2013 年低生态风险、较低生态风险和高生态风险面积比例均呈现上升趋势。土地利用转移则以林地、耕地、建设用地最为显著, 耕地总体呈现降低趋势, 而林地、建设用地总体则呈现上升趋势。

关键词:红枫湖水源保护区; 土地利用/覆被变化(LUCC); 土地利用转移矩阵; 生态风险演变

中图分类号:X37

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)06-0229-05

Land Use/Cover Change and Its Landscape Ecological Risk Evolution in the Drinking Water Source of Hongfeng Lake in Guiyang

LU Jianglin¹, LI Yangbing²

(1. Institute of Safety and Pollution Control of Atmospheric Environment, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. School of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The drinking water source of Hongfeng Lake in Guiyang City was selected as the study area. Based on three different periods of TM remote sensing image interpreting data in 1991, 2007 and 2013; from the angel of ecological risk assessment, using ArcGIS, ERDAS IMAGING terrace, and according to network sampling and Kriging interpolation we examined the changing of land utilization and regional landscape ecological risk in different time and range of Hongfeng Lake district. The results showed that the main ecological risk grade was moderate in recent 22 years. The area ratios of extremely low ecological risk, low ecological risk and moderate ecological risk fell slightly during the periods from 1991 to 2007. However, the area ratios of extremely low ecological risk, low ecological risk and extremely high ecological risk increased dramatically during the periods from 2007 to 2013. The transfer of land utilization mainly occurred in woodland, construction lands which present the ascendant trend and arable land which showed the decline trend.

Keywords: drinking water source; conservation district; land use/cover change; transition matrixes of land use; evolution of ecological risk

土地利用/覆被变化(LUCC)在全球范围环境变化和可持续发展研究中占有重要地位, 绝大部分自然生态系统的空间已被人类各种土地利用所改变, 土地利用/覆被变化在很大程度上记录了人与自然的相互作用的过程^[1]。在人为活动占优势的景观内, 不同土地利用方式和强度产生的生态影响具有区域性和累积性

的特征, 并且可以直观地反映在生态系统的结构和组成上^[2]。所以, 景观生态风险分析是在景观基础上, 描述人类活动或自然灾害对区域内生态系统结构、功能等产生不利生态效应的可能性和危害程度的过程^[3]。

区域生态风险评价是在区域尺度上描述和评估区域的环境污染、人为活动或自然灾害对生态系统及

其组分产生不利作用的可能性和危害程度,其目的在于为区域风险管理提供理论和技术支持^[4]。区域生态风险评价起源于环境生态风险评价,从 1980 年代开始至今,评价方法、内容、范围均有了很大的发展,风险受体从人体发展到种群、群落、生态系统和景观尺度^[5]。近年来,国内外学者通过建立景观格局对景观生态风险进行了定量的评价。一方面是对生态风险评价方法的探讨,例如,张思锋和刘晗梦对生态风险评价的方法进行了研究^[6];另一方面是运用景观生态学方法进行生态风险评价并对评价区域提出风险管理对策,例如,贡璐对于旱区内陆淡水湖进行了生态风险评价并提出了风险管理决策^[7],李自珍等以河西走廊的荒漠绿洲为例进行了生态风险评价与风险决策模型及应用^[8]。

本文以贵阳市红枫湖水源地保护区为研究对象,运用景观生态学原理和 ArcGIS 空间统计方法,构建不同土地利用方式生态风险权重参数,研究红枫湖保护区土地利用变化及其区域景观生态风险的空间分布和生态风险的空间演变规律。以期对红枫湖水源地保护区环境管理、生态建设提供决策参考、理论依据和技术支持。

1 研究区概况

红枫湖位于 106°19′—106°28′E, 26°26′N—26°35′N, 流域面积 1 596 km², 正常水位时湖泊水面面积 57.2 km², 总库容 6.01 亿 m³, 最大水深 45 m, 平均水深 11 m, 总有效库容 4.42 亿 m³。红枫湖是为数不多的高原湖泊, 是贵阳市主要饮用水源地之一。红枫湖位于贵州高原喀斯特地区。在这类地区, 碳酸盐岩峰体形态的差别主要受岩性和地质构造的控制。该地貌特有的生态脆弱性客观上决定了在其区域内易发生严重的水土流失和石漠化^[9]。同时, 不合理的土地利用和地表植被覆盖的减少对土壤侵蚀有放大效应^[10]。由于人类开发活动频繁, 已使红枫湖区域生态环境受到一定破坏, 导致水土流失面积达 22.5%^[11]。所以由人类活动而引起的土地利用方式的转变成为研究区生态风险的一个重要来源。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源与预处理

本文所需的 1991 年、2007 年和 2013 年 3 期影像数据分别来源于 30 m 分辨率的 TM 遥感影像。运用 ERDAS IMAGINE 9.2 软件对影像进行预处理。同时, 构建不同土地利用类型的判读标志并进行人机交互解译。将研究区土地利用类型划分为林地、耕地、建设用地、园地、水域、草地、裸岩 7 种一级景观类型(附

图 1)。其中建设用地包括城乡居住地、交用地和工业用地;耕地包括旱地和水田,水域包括河流、滩涂、湖泊和水库/坑塘;林地包括有林地和灌木林地。同时于 2013 年 10 月在研究区对前期的人机交互模式的遥感影像解释结果,经同期土地利用详查资料和典型区野外实地抽样调查验证,以提高影像解译精度。

2.2 评价单元选取及研究区范围划分

根据红枫湖保护区实际情况,本文将研究区域划分为 1 km×1 km 的正方形样地将土地利用生态风险综合指数进行空间化,采样方式为等间距系统采样法。研究区共有 565 个样方采样点,计算每一个方形格网的生态风险指数,将每一个方形格网的生态风险指数结果作为样地中心的生态风险值。

本文将红枫湖流域划分为一级保护区、二级保护区和准保护区三个保护区级别是根据贵州省人民政府黔府函[2004]271 号文所发布的红枫湖保护区界线而定。

2.3 研究方法

运用遥感(Remote Sensing, RS)、地理信息系统(Geographic Information System, GIS)、全球定位系统(Global Positioning System, GPS)“3S”技术手段,构建保护区生态风险评价指数模型,分析红枫湖沿岸保护区内土地利用转移方向及评价土地利用变化的生态风险。本文研究重点是红枫湖保护区内沿岸土地利用方式生态风险分析。故将红枫湖保护区内湖泊部分去除,单独考虑红枫湖保护区沿岸土地利用方式的演变。计算 1991—2007 年、2007—2013 年 2 个时段红枫湖保护区沿岸土地利用转移矩阵和红枫湖沿岸土地利用变化而引起的保护区生态风险强度变化及运用克里金插值法模拟保护区内生态风险的空间分布规律。

2.3.1 构建生态风险指数 为构建区域土地利用/覆被变化与生态风险之间的关系。本文引用生态风险指数^[12],构建生态风险指数 ER_i ,表示方形样区里生态风险值的大小,以此计算的生态风险指数结果作为方形样区中心点的生态风险值。以便通过采样方法将土地利用的空间结构转化为生态风险变量,即

$$ER_i = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \times R_i}{A} \quad (1)$$

式中: ER_i ——生态风险指数; n ——土地利用类型数量; A_i ——研究样方内第 i 种土地利用类型的总面积; A ——样地总面积; R_i ——第 i 种土地利用类型所反映生态风险强度参数。运用层次分析法,通过 3 位不同专家按照每两两地对生态风险的重要程度打分,其中同等重要为 1,稍微重要为 3,较强重要为 5,强烈重要为 7,极端重要为 9,两相邻判断的中间值为 2,4,6,8。将 3 位专家打分值加和得到每个评价因子的权重,然后求取每个因子的平均权重,这样就

可得到层次分析法所需的判断矩阵。最后通过层次分析法确定不同土地利用类型的生态风险权重参数 R_i 表示:林地 0.039,水域 0.026,草地 0.157,园地 0.07,耕地 0.116,建设用地 0.239,裸岩 0.353,并计算 CR 得到 $CR=0.016<0.1$,通过一致性检验。

2.3.2 空间统计方法 地统计学是一系列检测、模拟和估计变量在空间上的相关关系和格局的统计方法。区域生态风险指数本身是一种空间变量,空间变化具有结构性和随机性^[13]。本文借助 ArcGIS 地统计模块中的克里金空间插值方法,研究 1991 年、2007 年、2013 年红枫湖保护区土地利用变化对红枫湖水质的潜在生态风险压力影响。公式如下:

半变异函数:

$$r(h)=\frac{1}{2n(h)}\sum_i^{n(h)}[Z(x_i+h)-Z(x_i)]^2 \quad (2)$$

式中: $r(h)$ ——样本距为 h 的半方差; h 样本间隔距离; $n(h)$ 抽样间距为 h 时的样点对总数; z 某一系统属性的随机变量; x ——空间位置; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ ——变量在 x_i, x_i+h 点的取值。以半方差 $r(h)$ 为纵坐标,样本距 h 为横坐标作图,即为半方差图。充分利用 ArcGIS 的空间分析和地统计功能,通过求和、采样、普通 Kriging 空间插值,以及对所得的实际半方差图用球状模拟拟合,就可得到生态风险指数空间分布图。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

土地利用/覆被变化是自然因素和人为因素综合作用的结果,特别是在人类活动加剧的驱动下,各地类之间相互转化的时间不断缩短。土地利用转移矩

阵反映的是某一区域期初和期末地类面积转化的动态信息过程,它来源于系统分析中对系统状态与状态转移的定量描述^[14-16]。本文引用土地利用转移矩阵^[17],探讨红枫湖保护区从 1991—2013 年各地类相互转化的时空规律。

林地、建设用地、耕地和裸岩面积的变化对保护区内生态风险的演变具有决定性影响。根据土地利用转移矩阵可得到保护区土地利用变化方向。在 1991—2007 年,保护区内土地利用变化(表 1)主要表现在:耕地、林地面积减少,建设用地、草地和园地面积增加,而建设用地的增加和林地、耕地面积的减少成为 1991—2007 年土地利用方式转变的主要方向。建设用地主要由林地、耕地转化而来。而林地和耕地之间则相互转化。2007—2013 年保护区土地利用变化(表 2)主要是耕地减少,建设用地、林地、园地、水域、草地和裸岩面积的增加除了这几种地类之间的相互转化之外,其余均由耕地转化而来。与 1991—2007 年土地利用方式转变方向不同的是:2007—2013 年林地面积呈现明显的增长趋势。

总体来看,两个时期之间各种地类之间的相互转化、变化复杂。同一地类既有转入,也有转出。但是耕地面积比例持续降低;建设用地面积比例持续升高是两个时段内土地利用方式转变的主旋律,由此可以看出:保护区内社会经济的迅速发展由此而导致的耕地景观转化为建设用地景观的速度也加快。而林地面积则呈现先降低后增加趋势、总体呈现升高趋势,园地面积持续增加。这一特征与在保护区内实施“退耕还林工程”、发展观光旅游有着密不可分的关系。

表 1 红枫湖 1991—2007 年土地利用转移矩阵 hm²

土地利用类型		1991 年							
		草地	耕地	建设用地	林地	裸岩	水域	园地	总计
2007 年	草地	26.42	252.03	11.21	238.34	0.00	7.47	0.80	536.28
	耕地	51.66	22851.27	436.00	4088.00	1.26	212.24	339.45	27979.88
	建设用地	0.00	1914.72	535.62	344.74	0.71	27.07	21.44	2844.30
	林地	55.79	3886.32	128.19	10541.52	9.90	62.90	2.06	14686.68
	裸岩	0.63	11.99	0.95	11.01	2.96	0.00	0.00	27.54
	水域	0.00	274.69	5.46	78.25	0.00	227.76	17.59	603.74
	园地	0.00	398.13	18.55	109.77	0.00	6.77	368.19	901.41
	总计	134.50	29589.15	1135.99	15411.62	14.83	544.20	749.52	47579.82
	面积净变化	401.77	－1609.28	1708.31	－724.94	12.71	59.53	151.89	0

3.2 景观生态风险评价

根据公式(1)计算 1991 年、2007 年、2013 年 565 个评价单元的生态风险指数,为了便于比较研究区生态风险(ER_i)的大小,本文运用 ArcGIS 几何间断分类方法将评价单元的生态风险指数划分为 5 个风险级别,具体为:低生态风险区 I ($0.034\ 65\leqslant ER_i<0.061\ 69$)、较低生态风险区 II ($0.061\ 69\leqslant ER_i<0.076$

76)、中生态风险区 III ($0.076\ 76\leqslant ER_i<0.103\ 80$)、较高生态风险区 IV ($0.103\ 80\leqslant ER_i<0.152\ 33$)、高生态风险区 V ($0.152\ 33\leqslant ER_i\leqslant 0.239\ 39$)。根据不同风险指数级别,统计研究区 565 个评价单元不同生态风险指数的分级所占面积比例(图 1),按生态风险等级统计 3 个不同时期各保护区级别不同生态风险等级指数所占的面积,研究生态风险等级之间的相互转化规律。

在 1991—2013 年期间,各级生态风险存在明显差异,红枫湖保护区主要以中生态风险和较高生态风险为主。一级保护区低生态风险比例和准保护区高生态风险比例明显呈现上升趋势,年增长率为

1.24%,0.32%。一方面,核心保护区的生态风险强度指数降低,表明该区域生态环境的改善。另一方面,准保护区的生态风险强度指数上升,说明该区域自然环境恶化和人为干扰加剧。

表 2 红枫湖 2007—2013 年土地利用转移矩阵 hm²

土地利用类型	2007 年							
	草地	耕地	建设用地	林地	裸岩	水域	园地	总计
2013 年	草地	143.68	384.65	15.12	161.70	0.00	2.42	712.18
	耕地	137.59	20189.04	1132.47	3431.59	10.72	151.35	25322.00
	建设用地	23.14	1972.91	1320.78	394.35	1.34	29.84	3804.64
	林地	209.19	4562.32	303.97	10545.60	15.48	118.05	15821.13
	裸岩	10.34	16.47	1.17	8.38	0.00	0.00	36.36
	水域	3.79	321.58	40.76	93.98	0.00	275.94	751.08
	园地	9.07	532.63	34.13	85.48	0.00	19.65	1157.07
	总计	536.80	27979.60	2848.40	14721.08	27.54	597.24	47604.46
	面积净变化	175.38	-2657.61	956.24	1100.04	8.82	153.84	0.00

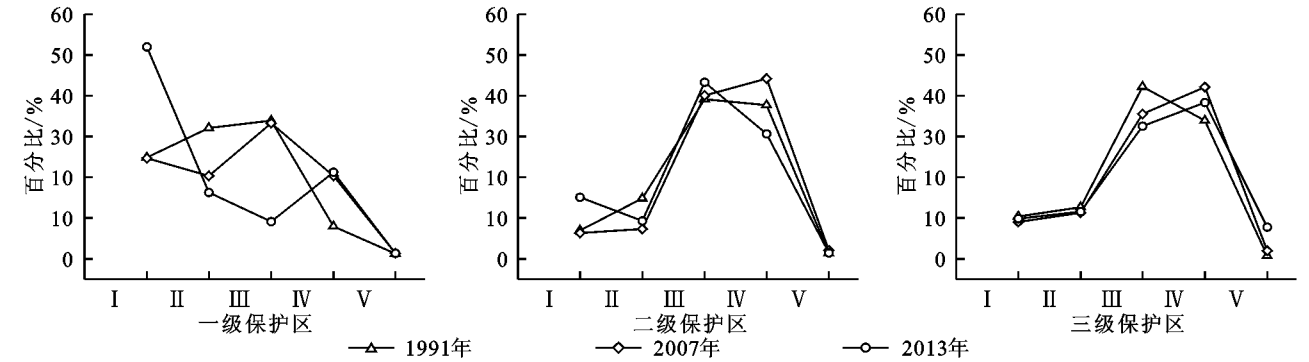


图 1 1991—2013 年研究区各级保护区生态风险面积所占比例

运用土地利用转移矩阵计算得到 1991—2007 年之间生态风险指数转移(表 3)主要体现在较高生态风险和高生态风险面积的增长而其他风险类型风险面积的降低。与前一时段相比在 2007—2013 年生态风险指数转移(表 4)主要是高生态风险、低生态风险和较低生态风险面积增加,中生态风险和较高生态风险面积的降低。这与 1991—2007 年时段内土地利用以耕地、林地面积减少而建设用地面积增大和 2007—2013 年时段内耕地面积减少而林地和建设用地面积增加所主导的土地利用方式的转变呈现相同的变化趋势。这表明,建设用地的扩张会导致区域生态风险范围和强度随之扩张、增强,同时林地面积的

增大却会降低区域生态风险强度和范围,起到缓和区域生态风险增强的作用。

3.3 生态风险空间分布

应用 ArcGIS 地统计分析模块(Geostatistical Analyst)中的普通 Krging(克里金插值)方法对红枫湖保护区 1991 年、2007 年、2013 年数据进行空间内插,并用研究区的边界裁剪,得到红枫湖保护区 3 个不同时期的生态风险空间分布(附图 2)。1991 年研究区内低生态风险面积比例为 10.10%,中生态风险和较高生态风险面积比例分别为 41.06%,33.87%。主要分布在一级保护区内以及准保护区内马场镇和高峰镇之间的大部分区域。

表 3 红枫湖 1991—2007 年生态风险指数转移矩阵 hm²

生态风险级别	1991 年					总计
	低生态风险	高生态风险	较低生态风险	较高生态风险	中生态风险	
2007 年	低生态风险	3464.82	0.00	720.06	50.16	4235.04
	高生态风险	0.00	298.94	0.00	634.41	933.35
	较低生态风险	757.07	0.00	2739.12	0.00	4986.78
	较高生态风险	220.01	17.57	159.91	13953.53	19911.64
	中生态风险	313.35	100.00	3032.43	1556.33	17513.01
	总计	4755.25	416.51	6651.53	16194.44	47579.82
	面积净变化	-520.21	516.84	-1664.75	3717.21	-2049.09

表 4 红枫湖 2007—2013 年生态风险指数转移矩阵 hm²

生态风险级别	2007 年					总计
	低生态风险	高生态风险	较低生态风险	较高生态风险	中生态风险	
低生态风险	3136.64	0.00	1652.12	382.13	924.46	6095.35
高生态风险	0.97	817.88	0.00	1604.28	344.63	2767.76
较低生态风险	768.90	0.00	1803.48	283.67	2460.84	5316.90
2013 年 较高生态风险	100.00	118.54	214.88	13035.68	3511.21	16980.31
中生态风险	223.68	0.00	1344.46	4619.18	10256.82	16444.14
总计	4230.20	936.42	5014.94	19924.93	17497.97	47604.46
面积净变化	1865.15	1831.34	301.96	−2944.62	−1053.83	0.00

与 1991 年相比,2007 年高生态风险和较高生态风险所占面积比例升高 1.09%,7.99%,主要是由于清镇市城市扩张导致大量耕地、林地景观转化为建设用地景观。低生态风险、较低生态风险和中生态风险分布降低 1.16%,3.39%和 4.37%。主要是在清镇市区西北角和准保护区东南角部分林地景观转化为更为脆弱的草地景观,甚至部分区域还发生比较严重的石漠化。

2013 年准保护区内的清镇市和夏云镇城区及周围最明显的变化是高生态风险等级区域的范围明显扩张,与 2007 年相比 2013 年整个保护区高生态风险升幅达 3.85%。主要是因为夏云镇在 2005 年建成“夏云工业园”以及清镇市城市化进程的加速。特别是,在马场镇、高峰镇和夏云镇之间,随着我国第八个国家级新区的贵州省“黔中经济区”核心地带“贵安新区”建设的加速,导致大量耕地、林地转化为建设用地,从而引起该区域生态风险等级升高。但是在清镇市和夏云镇周围除上述地域风险等级升高之外其他地域较高生态的范围呈现降低趋势。这与贵州省于 2000—2006 年,在红枫湖流域实施“退耕还林工程”政策有着密不可分的关系。

纵观红枫湖景观生态风险分布特征,在城市化和工业化的驱动力下清镇市和夏云镇生态风险强度和范围明显扩张。但从总体来看,除清镇市、夏云镇、马场镇、高峰镇周围生态风险明显增强外,其他部分区域的生态风险空间分布范围却呈现缩小趋势。

4 结论与讨论

研究区内土地利用转移方向以林地、耕地向建设用地转化为主。由此可见,由城市化和工业化所主导的人类活动对保护区生态风险的贡献最大。红枫湖保护区的生态风险指数分布在 0.028 32~0.239 39,这表明红枫湖保护区的生态风险峰值较低,1991—2007 年高生态风险和较高生态风险所占面积比例显著增加,与此不同的是 2007—2013 年之间生态风险的转化方向主要是向地生态风险和高生态风险。同

时,2007—2013 年时间段内一级保护区内生态风险指数的降低和准保护区内生态风险指数的升高凸显了社会经济发展和生态环境保护之间的矛盾。

本文利用 ArcGIS,ERDAS IMAGING 手段对红枫湖保护区土地利用转变和景观生态风险分布规律进行了研究,突破了以往研究者以行政区为研究界线的限制。本文在构建生态风险权重指数时忽略了经济、社会等因子对生态风险的影响。但是经济、社会等因子的变化在一定程度上会通过土地利用景观格局变化而表现。所以本文通过研究不同土地利用景观格局的变化来模拟区域生态风险的变化具有现实意义。此外,本文为研究方便将生态风险指数划分为 5 类相对指标,该相对指标与其他不同研究区域不具有可比性。本文可作为区域环境管理决策提供可靠依据和理论支撑。根据不同级别生态风险及影响因素提出相应的保护和生态建设对策,以实现红枫湖保护区水质环境改善、区域社会经济协调发展。

参考文献:

[1] 吴次芳,宋戈.土地利用学[M].北京:科学出版社,2009.

[2] 曾辉,刘国军.基于景观结构的区域生态风险分析[J].中国环境科学,1999,19(5):454-457.

[3] Barrell S M, Gardner R H, O'Neill R V. Ecological Risk Estimation[M]. Boca Raton: Lew Publisher,1992.

[4] 许学工,布仁仓.黄河三角洲湿地区域生态风险评价[J].北京大学学报:自然科学版,2001,37(1):111-120.

[5] 曾勇.区域生态风险评价[J].生态学报,2010,30(3):668-673.

[6] 张思锋,刘哈梦.生态风险评价方法述评[J].生态学报,2010,30(10):2735-2744.

[7] 贡璐,鞠强,潘晓玲.博斯腾湖区域景观生态风险评价研究[J].干旱区资源与环境,2007,21(1):27-31.

[8] 李自珍,何俊红.生态风险评价与风险决策模型及应用:以河西走廊荒漠绿洲[J].兰州大学学报:自然科学版,1999,35(3):149-156.

[9] 夏品华,李秋华,张明时.贵州高原“两湖一库”富营养化防治途径探讨[J].环境监测管理与技术,2011,23(6):73-76.

(4) 青海省整个区域风速的变化对风蚀气候因子指数变化影响最大,风蚀气候侵蚀因子指数与风速有很好的对应关系,与降水量和沙尘暴日数的对应关系较差,可以利用C值与风速的回归方程来估算风蚀气候因子指数的值。

青海省整体风蚀气候侵蚀力不算很严重,柴达木盆地西部局部达到“极重”级,但土壤风蚀的灾害却非常严重,表明土壤风蚀是多种因素共同作用的结果,本文仅仅研究了土壤风蚀的气象因素,更多有关土壤风蚀的研究尚待开展。

参考文献:

- [1] 董玉祥. 沙漠化灾害危险度评价的初步研究[J]. 自然灾害学报, 1993, 2(3): 103-109.
- [2] Chepil W S, Siddoway F H, Armbrust D V. Climatic factor for estimating wind erodibility fields[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1962, 17(4): 162-165.
- [3] Skidmore E L. Wind erosion climatic erosivity[J]. Climatic change, 1986, 9(1/2): 195-208.
- [4] 柯克比 M J, 摩根 R P C. 土壤侵蚀[M]. 王礼先, 吴斌, 洪惜英, 译. 北京: 水利电力出版社, 1987.
- [5] 拉尔 R. 土壤侵蚀研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- [6] 董玉祥, 康国定. 中国干旱半干旱地区风蚀气候侵蚀力的计算和分析[J]. 水土保持学报, 1994, 8(3): 1-7.
- [7] 方祖光, 谢皎如. 福建沿海地区干燥度和风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 1997, 13(3): 96-103.
- [8] 王永, 赵举, 程玉臣. 阴山北麓农牧交错带风蚀气候侵蚀力的计算与分析[J]. 华北农学报, 2005, 20(专辑): 57-60.
- [9] 朱丽, 秦富仓, 杨翠林, 等. 阴山北麓农牧交错带土壤侵蚀驱动机制研究[J]. 水土保持研究, 2008, 15(5): 34-37.
- [10] 冯伟, 张兴昌, 高照良. 风力侵蚀对西气东输(甘肃段)工程影响分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(2): 244-251.
- [11] 何清, 胡文峰, 杨兴华, 等. 拐子湖地区沙尘天气风蚀起沙量的估算[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 6-10.
- [12] 蒋冲, 陈爱芳, 喻小勇, 等. 黄土高原风蚀与水蚀复合区的风蚀气候侵蚀力变化[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 477-483.
- [13] 杨兴华, 何清, 李红军, 等. 塔里木盆地风蚀气候侵蚀力的计算和分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 990-995.
- [14] 郑度. 青藏高原形成环境与发展[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003.
- [15] 王根绪, 李元寿, 王一博. 青藏高原河源区地表过程与环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [16] 李林, 汪青春, 时兴合, 等. 青海省太阳能风能监测评估服务技术[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
- [17] 中国气象局. 生态质量气象评价规范[M]. 北京: 中国气象局, 2005.
- [18] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [19] 方精云. 地理要素对我国温度分布影响的数量评价[J]. 地理学报, 1992, 12(2): 97-104.
- [20] 张嘉琪, 任志远. 1977—2010年柴达木盆地地表潜在蒸散时空演变趋势[J]. 资源科学, 2014, 36(10): 2103-2112.
- [21] 王江山, 李锡福. 青海天气气候[M]. 北京: 气象出版社, 2004.

(上接第233页)

- [10] 柳长顺, 齐实, 史明昌. 土地利用变化与土壤侵蚀关系的研究进展[J]. 水土保持学报, 2001, 15(5): 10-17.
- [11] 姜鑫, 安裕伦, 杨柏林, 等. 基于GIS和RS的水源地生态环境现状分析: 以贵阳市红枫百花流域为例[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2006, 23(4): 46-49.
- [12] 杜军, 杨青华. 基于土地利用变化和空间统计学的区域生态风险分析: 以武汉市为例[J]. 国土资源遥感, 2010(2): 102-106.
- [13] 孙丽娜, 宋戈. 松嫩高平原黑土区土地利用/覆被变化及其景观生态风险分析[J]. 水土保持研究, 2012, 19(1): 148-158.
- [14] 徐岚, 赵羿. 利用马尔柯夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272-277.
- [15] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘: 以江苏省苏州市为例[J]. 地理研究, 2013, 32(8): 1497-1507.
- [16] 赵哲远, 马奇, 华元春, 等. 浙江省1996—2005年土地利用变化分析[J]. 中国土地科学, 2009, 23(11): 55-60.
- [17] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. 地理学报, 2003, 58(5): 643-650.