

长江上游水源涵养区界定及生态安全影响因素分析

董伟^{1,2)} 蒋仲安¹⁾ 苏德²⁾ 高吉喜²⁾

1) 北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083 2) 中国环境科学研究院, 北京 100012

摘 要 对长江上游水源涵养区进行了详细地划分, 采用生态系统内外部指标相结合的方法, 建立界定指标体系, 以界定模型结合 ArcGIS 空间分析模块的手段, 界定出重点水源涵养区. 结合研究区实际情况, 根据压力-状态-响应 (P-S-R) 框架模型建立了多层次结构的生态安全评价指标体系. 运用层次分析-向量相似度-主成分投影法对重点水源涵养区生态安全状况进行评价. 针对评价结果, 采用灰关联分析方法进行研究区生态安全影响因素关联度综合分析. 研究结果表明: 影响研究区生态安全的主要因素是降雨量、GDP 增长率、水资源有效利用率、植被覆盖度和水环境质量.

关键词 生态安全; 界定; 灰关联; 水源涵养区

分类号 X 171.1

Delimitation of water conservation areas in the upper Yangtze River and analysis of influencing factors on eco-security

DONG Wei^{1,2)}, JIANG Zhong'an¹⁾, SU De²⁾, GAO Jixi²⁾

1) School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

ABSTRACT In order to partition water conservation areas in the upper Yangtze River, inner and external indexes in an ecosystem were used to construct a delimitation index system, and the key water conservation areas were delimited by the delimitation model in combination with the ArcGIS Spatial Analyst. Based on the actual situation of research areas, a multi-level and multi-structure index system for eco-security assessment was built with the PSR (pressure-state-response) model framework. Eco-security assessment of the key water conservation areas was carried out by a combined application of AHP (analytic hierarchy process), vector similarity and principal component projection method. Gray correlation was added in finding out the main influencing factors on regional eco-security. The results show that these main factors are rainfall, increase rate of GDP, effective utilization rate of water resources, vegetation coverage and water environmental quality.

KEY WORDS ecological security; delimitation; gray correlation; water conservation area

随着全球生态的恶化和环境问题的日益严重, 长江流域生态灾难频繁发生, 因此长江上游的洪水控制成为生态安全乃至整个区域安全的重中之重. 生态安全研究已成为人们关注的焦点, 其核心是生态系统服务功能研究, 而水源涵养功能又是生态系统功能的核心内容之一. 水源涵养区则是体现生态系统服务功能的重要区域, 处于大江、大河源头, 大型水利工程周围, 且长期为城市 and 农村发展提供稳定的给水来源, 区域自身具有优越持水能力的区域都被划为水源涵养区, 其主要功能在于通过林冠截

留、树干截留、林下植被截留、枯落物持水和土壤储水对大气降雨进行再分配, 从而实现调节地表径流、缓洪蓄水、增加水资源的目的. 目前, 薛达元等^[1]、黄志刚等^[2]、关文彬等^[3]、张三焕等^[4]和吴波等^[5]分别应用区域年径流量核算法、森林集水区法、土壤蓄水估算法、降水储量估算法和地下径流增长法等对不同水源涵养区进行了划分; 这些研究主要集中于区域内在生态功能的研究上, 较少考虑外部因素对水源涵养功能的影响, 对水源涵养区的划分界定和区域水源涵养的系统性研究较少. 因此, 本文

收稿日期: 2009-04-08

基金项目: 联合国环境规划署 UNEP 资助项目 (No. MTS/GFL-2328-2740-4822)

作者简介: 董伟 (1978-), 男, 博士研究生; 蒋仲安 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: jza1963@263.net

在 GIS 技术的基础上, 提出划定水源涵养区的外部指标, 利用界定模型对长江上游的水源涵养区进行界定研究.

1 研究区概况

选取长江上游为研究区域. 长江上游为源头至宜昌段, 长 4 511 km, 约占长江总长的 70%. 上游干流经青、藏、滇、川、鄂和渝六省 (直辖市), 流域范围涉及青、藏、滇、甘、川、陕、渝、鄂和黔九个省 (自治区、直辖市) 的 363 个县, 流域面积为 $1.05 \times 10^6 \text{ km}^2$, 占整个长江流域面积的 58.9%. 总人口为 1.9 亿, 是我国藏族、羌族和彝族等少数民族的重要聚居区. 长江上游地跨我国大地形的第 1 和第 2 级阶梯, 海拔从 400 m 到 5 000 m 以上, 相对高差超过 4 000 m. 特殊的地形地貌、复杂的气候类型、丰富的植被覆盖和多元的人地关系, 构成了长江上游复杂的生态系统和社会经济格局. 图 1 为研究区范围图.

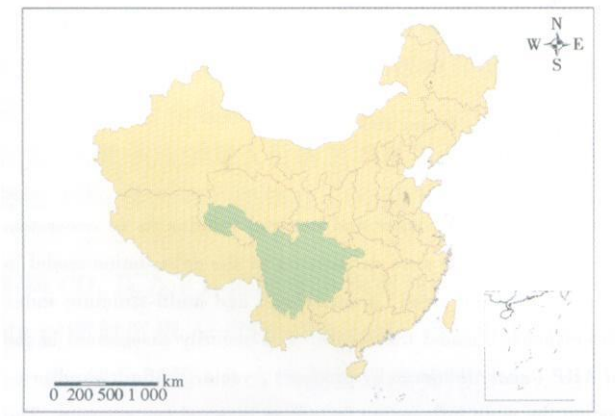


图 1 研究区的范围
Fig. 1 Research area

2 水源涵养区的界定

2.1 界定指标

在原有的内部指标林冠截留能力、枯落物持水能力和土壤蓄水能力的基础上加入外部指标坡度和降雨, 确定长江上游各类森林林冠层、枯落物层和土壤层三个水文生态功能指标参数, 界定指标如表 1 所示.

表 1 界定指标

Table 1 Delimitation indexes

内在指标	外在指标
林冠截留能力	降雨
枯落物持水能力	坡度
土壤持水能力	

2.2 水源涵养区界定模型

通过以下模型来计算长江上游的水源涵养量:

$$T=CI+LC+S \tag{1}$$

式中, T 为单位面积水源涵养量, mm; CI 为单位面积冠层截留量, mm; LC 为单位面积枯落物持水量, mm; S 为单位面积土壤持水量, mm.

2.3 长江上游水源涵养量计算

结合以上指标体系和界定模型, 运用 ArcGIS 技术分别计算研究区植被水源涵养量、土壤水源涵养量和坡度水源涵养量, 再综合得到长江上游水源涵养能力图, 然后结合研究区降雨量, 最终划分出重点水源涵养区.

(1) 长江上游植被水源涵养量计算. 利用 ArcGIS 9.0 中的属性表编辑功能进行计算和作图, 以 $1:1 \times 10^6$ 长江上游植被类型图为底图, 将长江上游所有的植被类型归纳为 4 个大类、16 个小类, 然后将 16 个小类植被的水源涵养量 (包括枯枝落叶的持水量) 输入到属性表当中, 得到 $500 \text{ m} \times 500 \text{ m}$ 的栅格数据, 这样就完成了从名称类型到属性类型的转化. 根据自然植被水源涵养量的差异和专家讨论意见, 对其进行分级 (表 2) 得到长江上游植被水源涵养能力分布图, 如图 2 所示.

表 2 水源涵养能力分级表

Table 2 Classification of water conservation ability

能力 分级	植被水源 涵养能力 /mm	土壤水源 涵养能力 /mm	坡度水源 涵养能力 /($^{\circ}$)
微弱	0~0.74	0~2.25	0~5
弱	0.75~2.47	2.26~3.65	5~10
一般	2.48~5.54	3.66~9.79	10~15
较强	5.55~8.84	9.80~14.87	15~25
强	8.85~10.30	14.88~38.93	>25

(2) 长江上游土壤水源涵养量计算. 土壤水源涵养能力是根据长江上游 $1:1 \times 10^6$ 土壤类型来确定的, 将长江上游的土地类型归纳为 8 类土纲、30 个土类, 通过对属性表进行计算得到土壤的水源涵养量, 根据土壤水源涵养量的差异和专家讨论意见, 对其进行分级 (表 2), 得到长江上游土壤水源涵养能力分布图, 如图 3 所示.

(3) 长江上游坡度水源涵养量计算. 坡度的水源涵养能力是通过 DEM 数字高程图来确定的, 主要思想是坡度与水源涵养能力成反比. 根据坡度水源涵养能力的差异和专家讨论意见, 对其进行分级 (表 2), 得到长江上游坡度水源涵养能力分布图, 如图 4 所示.

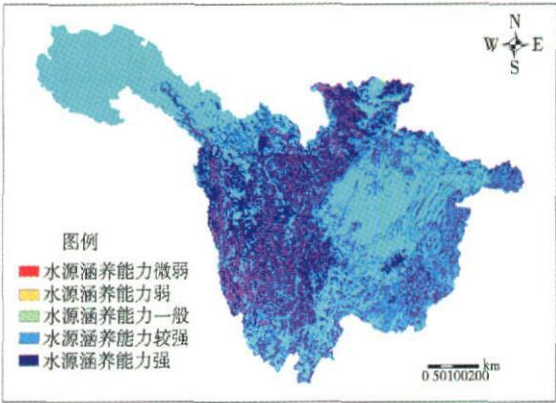


图 2 长江上游植被水源涵养能力分布图

Fig 2 Classification of vegetation water conservation ability in the upper Yangtze River

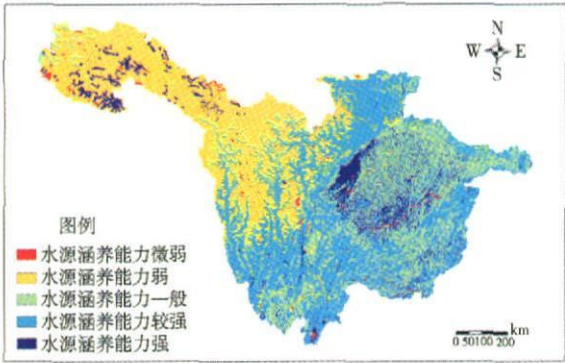


图 3 长江上游土壤水源涵养能力分布图

Fig 3 Classification of soil water conservation ability in the upper Yangtze River

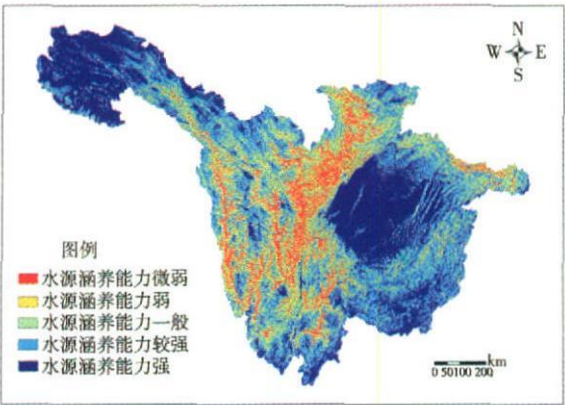


图 4 长江上游坡度水源涵养能力分布图

Fig 4 Classification of slope water conservation ability in the upper Yangtze River

(4) 长江上游水源涵养能力分布. 依据上述对数据的准备、重分类后量纲为 1 化处理, 进行空间叠加分析, 像元为 $500\text{ m}\times500\text{ m}$, 得到长江上游水源涵养能力图, 如图 5 所示.

(5) 长江上游降雨分布. 对长江上游 257 个气象站 50 a 的气象站点采集数据, 转入 Access 数据

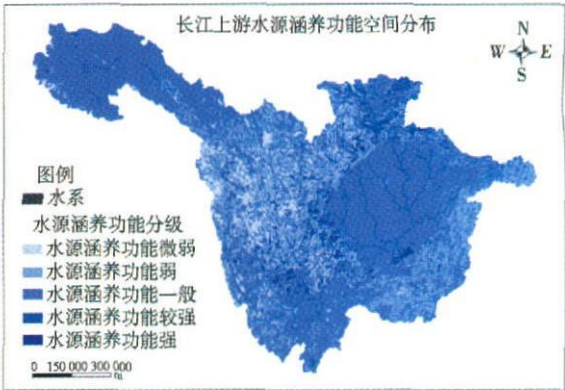


图 5 长江上游水源涵养能力分布图

Fig 5 Classification of water conservation ability in the upper Yangtze River

库, 经整理、检查, 形成原始数据库, 包括各站点的经纬度、海拔. 各气象站点的地理坐标以国家气象局 1990 年 9 月公布的“全国气象台站区站号码表”为准. 将得到的年降水量数据进行空间插值, 得到长江上游降水分布图, 如图 6 所示.

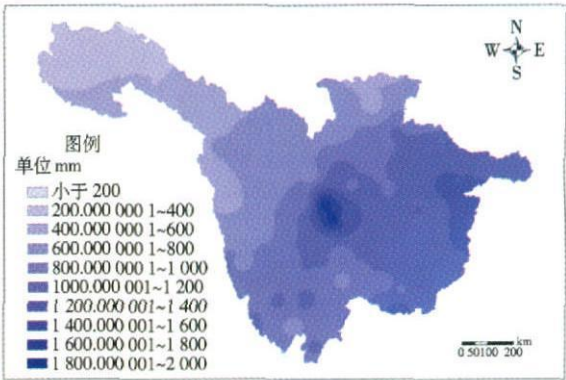


图 6 长江上游降雨分布图

Fig 6 Classification of rainfall in the upper Yangtze River

通过得到的长江上游水源涵养能力图与降水量图进行空间叠加分析, 根据水源涵养区的定义, 得到长江上游重点水源涵养区, 如图 7 所示.

3 长江上游水源涵养区生态安全评价

3.1 指标体系的建立

根据“压力-状态-响应”(P-S-R)概念框架模型^[6-7], 从生态系统的结构与功能出发建立重点水源涵养区区域生态系统安全评价指标体系^[8-9], 以行政县界为评价单元, 利用综合评价模型对重点水源涵养区进行综合评价, 指标体系如表 3 所示.

3.2 评价方法和评价结果

运用层次分析-向量相似度-主成分投影法^[10]对重点水源涵养区生态安全状况进行评价, 根据评价模型计算得到重点水源涵养区的生态安全综合评

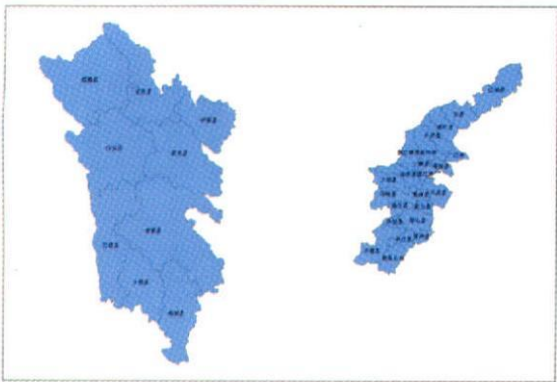


图 7 长江上游重点水源涵养区分布图

Fig 7 Classification of the key water conservation areas in the upper Yangtze River

价结果 (表 4)和阈值 (表 5), 等级划分如图 8所示. 在长江上游两个重点水源涵养区中, 大部分地区处于较不安全状态, 少部分地区处于较安全状态. 从总体看, 右区的生态安全状况还是相对稳定的, 在经济发展的同时注重环境的保护和可持续发展, 虽然

人口相对集中, 对环境影响较大, 但是环保意识较强; 左区中的所有县均在较不安全状态. 其因为这些地区生产力水平较低, 主要依靠农业和旅游业发展经济, 工业发展较少, 虽然这些县的植被覆盖度较高, 但是人们的环境保护观念较差, 对压力的响应不足, 而且环保投入较少.

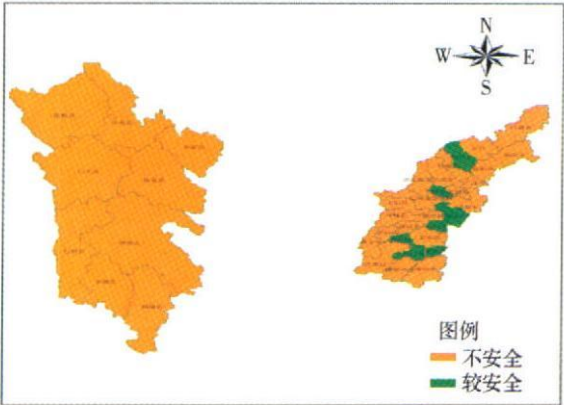


图 8 评价等级图

Fig 8 Assessment grades

表 3 水源涵养区生态安全评价指标体系

Table 3 Index system for eco-security assessment of water conservation areas

目标层	准则层 A	准则层 B	要素层 C	指标层 D
水源涵养区生态安全 O	状态 (A ₁)	立地状态 (B ₁)	土地 (C ₁)	土地开发率 (D ₁)
			地形 (C ₂)	坡度 (D ₂)
			气候 (C ₃)	降雨量 (D ₃)
		资源环境状态 (B ₂)	资源 (C ₄)	人均水资源 (D ₄)
				水环境质量 (水质) (D ₅)
		生物状态 (B ₃)	植被 (C ₅)	植被覆盖度 (D ₆)
			物种 (C ₆)	濒危物种比例 (D ₇)
				自然保护区面积比例 (D ₈)
	压力 (A ₂)	人口压力 (B ₄)	人口 (C ₇)	人口密度 (D ₉)
				人口自然增长率 (D ₁₀)
		经济压力 (B ₅)	经济发展 (C ₈)	GDP 年均增长率 (D ₁₁)
				人均 GDP (D ₁₂)
				工业增加值年均增长率 (D ₁₃)
				农业增加值年均增长率 (D ₁₄)
	响应 (A ₃)	状态响应 (B ₆)	生态保护 (C ₉)	污染治理资金投入 (D ₁₅)
			资源保护 (C ₁₀)	单位 GDP 需水量 (D ₁₆)
				水资源有效利用率 (D ₁₇)
				农业生产率 (D ₁₈)
		压力响应 (B ₇)	人类活动 (C ₁₁)	产业结构 (D ₁₉)
				公共教育支出占 GDP 比例 (D ₂₀)
				小学生入学率 (D ₂₁)

表 4 评价结果
Table 4 Assessment results

区域	什邡市	绵竹市	广汉市	江油市	安县	彭州市	新都县	崇州市
评价值	0.3514	0.3627	0.3345	0.2998	0.2962	0.3299	0.3476	0.3058
区域	邛崃县	都江堰	郫县	大邑县	新津县	蒲江县	温江县	双流县
评价值	0.3236	0.3350	0.3630	0.3458	0.3749	0.3522	0.3408	0.3854
区域	彭山县	洪雅县	眉山县	青神县	丹棱县	夹江县	峨眉山	甘孜县
评价值	0.3596	0.3536	0.3270	0.3545	0.3851	0.3585	0.3313	0.2866
区域	白玉县	巴塘县	德格县	新龙县	乡城县	炉霍县	理塘县	稻城县
评价值	0.2527	0.2452	0.2484	0.2642	0.2740	0.2726	0.2712	0.2710

表 5 阈值表
Table 5 Thresholds

等级	高度安全	安全	较安全	不安全	极不安全
阈值	≥0.9530	[0.5114, 0.9530)	[0.3544, 0.5114)	[0.2047, 0.3544)	<0.2047

4 水源涵养区生态安全影响因素关联度分析

选用灰色关联分析方法进行研究区生态安全影响因素关联度综合分析^[11-12]。该方法的核心是计算关联度，具体步骤如下。

(1) 确定分析序列。在对所研究问题进行定性分析的基础上，确定一个因变量因子和多个自变量因子。设因变量数据构成参考序列 X_0' ，各自变量数据构成比较序列 X_i' ($i=1, 2, \dots, n$)。

(2) 对变量序列进行量纲为一化。一般情况下，原始变量序列具有不同的量纲或数量级，为了保证分析结果的可靠性，需要对变量进行量纲为一化。本文采用初始化法进行量纲为一化。

(3) 求差序列、最大差和最小差。计算量纲 1 矩阵中第一列（参考序列）与其余各列（比较序列）对应的绝对差，形成如下绝对差值矩阵：

$$\begin{bmatrix} \Delta_{01}(1) & \Delta_{02}(1) & \cdots & \Delta_{0n}(1) \\ \Delta_{01}(2) & \Delta_{02}(2) & \cdots & \Delta_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \Delta_{01}(N) & \Delta_{02}(N) & \cdots & \Delta_{0n}(N) \end{bmatrix}_{N \times n}$$

式中，

$$\Delta_{0i}(k) = |x_0(k) - x_i(k)|$$

($i=0, 1, 2, \dots, n$; $k=1, 2, \dots, N$)

(2)

(4) 计算关联系数。对绝对差值矩阵中数据做如下变换：

$$\xi_{0i}(k) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_{0i}(k) + \rho\Delta(\max)}$$

(3)

得到关联系数矩阵：

$$\begin{bmatrix} \xi_{01}(1) & \xi_{02}(1) & \cdots & \xi_{0n}(1) \\ \xi_{01}(2) & \xi_{02}(2) & \cdots & \xi_{0n}(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \xi_{01}(N) & \xi_{02}(N) & \cdots & \xi_{0n}(N) \end{bmatrix}_{N \times n}$$

式 (3) 中，分辨系数 ρ 在 (0, 1) 内取值，一般情况下多在 (0.1, 0.5) 内取值，分辨系数越小，能提高关联系数之间的差异。关联系数 $\xi_{0i}(k)$ 是不超过 1 的正数， $\Delta_{0i}(k)$ 越小， $\xi_{0i}(k)$ 越大，它反映第 i 个比较序列 X_i 与参考序列 X_0 在第 k 期的关联程度。

(5) 计算关联度。比较序列 X_i 与参考序列 X_0 的关联程度是通过 N 个关联系数来反映的，求平均值就可以得到 X_i 与 X_0 的关联度：

$$\gamma_{0i} = \sum_{k=1}^N \xi_{0i}(k) / N$$

(4)

(6) 排关联序。根据关联度判断各评价样本中比较序列与参考序列的关联程度，比较序列中指标的关联度越大，说明该指标与参考序列的变化态势越一致，对参考序列的影响越大。

根据灰关联分析方法，以研究区评价结果为因变量序列，按照上述步骤得到长江上游重点水源涵养区生态安全影响因素分析结果，如图 9 和图 10 所示。

由图 9 可以看出，影响左区生态安全状况的主要指标有降雨量、水环境质量、GDP 年均增长率、农业增加值年均增长率、水资源有效利用率和公共教育支出占 GDP 比例。纵观左区整体的生态安全情况还是比较堪忧的，尽管自然条件相对完好，但是整体的生产力水平不高，农业还是国民经济中的重要部分，对待压力的响应还是较差的。

由图 10 可以得出，与右区生态安全状况紧密相关的指标有降雨量、植被覆盖度、GDP 年均增长率、

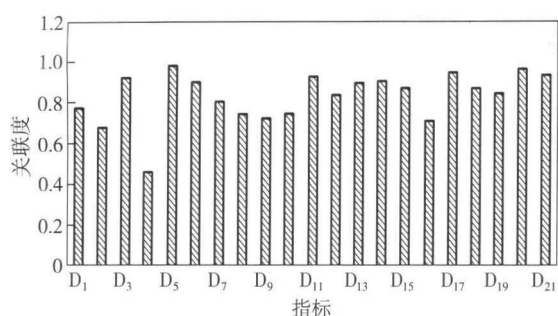


图 9 左区生态安全影响因素关联度

Fig 9 Degree of relatedness of eco-security influencing factors in the left areas

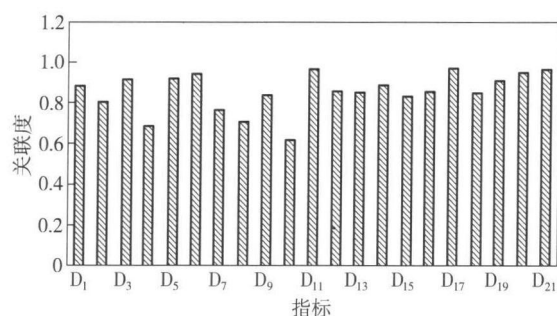


图 10 右区生态安全影响因素关联度

Fig 10 Degree of relatedness of eco-security influencing factors in the right areas

水资源有效利用率、公共教育支出占 GDP 比例和小学生入学率。总的来说,右区的生态安全状况较好,不过由于城市化的进程过快以及水资源消耗与供给的矛盾都会成为生态安全稳定的隐患。

5 结论

(1) 根据内外部指标体系,通过界定模型结合 ArcGIS 空间分析技术的方法界定出的重点水源涵养区,是长江上游的洪水控制和生态管理的典型区域。

(2) 根据生态安全评价和影响因素关联度分析结果,虽然各区域的生态安全状态差异不大,但是影响因素却不尽相同,因此各地区应根据实际情况因地制宜地进行生态规划与管理。

(3) 结合长江上游重点水源涵养区经济社会发展状况,其生态治理应走可持续发展的道路,加强土地生态恢复和重建,发展生态农业,建立和完善区域生态环境补偿机制。

参 考 文 献

[1] Xue D Y, Bao H S, Li W H. A valuation study on the indirect values of forest ecosystem in Changbaishan Mountain Biosphere Reserve of China. *China Environ Sci* 1999, 19(3): 247
(薛达元, 包浩生, 李文华. 长白山自然保护区森林生态系统间接经济价值评估. *中国环境科学*, 1999, 19(3): 247)

[2] Huang Z G, Ouyang Z Y, Li F R, et al. Progress in the effects of forest ecosystem on runoff based on forest catchments. *World For Res* 2009, 22(3): 36
(黄志刚, 欧阳志云, 李锋瑞, 等. 基于集水区法的森林生态系统影响径流研究进展. *世界林业研究*, 2009, 22(3): 36)

[3] Guan W B, Wang Z L, Chen J C, et al. Evaluation of forest ecosystem services in Gongga Mountain. *J Beijing For Univ* 2002, 24(4): 80
(关文彬, 王自力, 陈建成, 等. 贡嘎山地区森林生态系统服务功能价值评估. *北京林业大学学报*, 2002, 24(4): 80)

[4] Zhang S H, Zhu Z, Li J H. Ecological benefits of Changbai Mountain forest reserves: the case of Wangqing Forest. *Resour Sci* 2002, 24(6): 74
(张三焕, 朱哲, 李京花. 长白山森林生态效益资产评估研究——以汪清林区为例. *资源科学*, 2002, 24(6): 74)

[5] Wu B, Shi P L, Jing X H, et al. Water conservation capacity and its value evaluation of vegetation types in eastern Daxinganling Mountain forest area. *For Res* 2006, 19(6): 706
(吴波, 石培礼, 井学辉, 等. 大兴安岭东部林区植被蓄水潜力与价值的评估. *林业科学研究*, 2006, 19(6): 706)

[6] Zuo W, Zhou H Z, Wang Q. Conceptual framework for selection of an indicator system for assessment of regional ecological safety. *Soils* 2003, 18(1): 2
(左伟, 周慧珍, 王桥. 区域生态安全评价指标体系选取的概念框架研究. *土壤*, 2003, 18(1): 2)

[7] Pan A H, Pei W. Design on evaluate indicator system of eco-environment quality in Qilian Mountains. *J Gansu For Sci Technol* 2004, 29(2): 11
(潘爱华, 裴雯. 祁连山区生态环境质量评价指标体系的构建. *甘肃林业科技*, 2004, 29(2): 11)

[8] Ye Y P, Liu L J. A preliminary study on assessment indicator system of provincial eco-environmental quality in China. *Res Environ Sci* 2000, 13(3): 33
(叶亚平, 刘鲁军. 中国省域生态环境质量评价指标体系研究. *环境科学研究*, 2000, 13(3): 33)

[9] Zuo W, Wang Q, Wang W J, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard. *Geogr Territorial Res* 2002(1): 67
(左伟, 王桥, 王文杰, 等. 区域生态安全评价指标与标准研究. *地理学与国土研究*, 2002(1): 67)

[10] Xiong Y. Research on Ecological Security Synthetic Assessment of Hunan [Dissertation]. Changsha: Hunan University, 2008
(熊鹰. 湖南省生态安全综合评价研究 [学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2008)

[11] Wu K Y, Sun S Q, Nie L. Grey associative analysis for assessment of ecological security. *J Anhui Agric Univ* 2004, 31(3): 368
(吴开亚, 孙世群, 聂磊. 生态安全的灰关联评价方法探讨. *安徽农业大学学报*, 2004, 31(3): 368)

[12] Guan X K, Wu K N, Wang X L. Application of grey correlation analysis approach to the urban eco-security evaluation. *J Saf Environ* 2008, 8(1): 105
(关小克, 吴克宁, 王秀丽. 灰关联分析在城市生态安全评价中的应用. *安全与环境学报*, 2008, 8(1): 105)