

基于探索性空间数据分析的安吉县 水土流失时空变异规律研究

江振蓝^{1,2}, 苏世亮², 荆长伟², 林声盼², 吴嘉平^{2*}

(1. 闽江学院 地理科学系, 福建 福州 350108; 2. 浙江大学 环境与资源学院, 浙江 杭州 310058)

摘要:实时、准确地掌握区域水土流失时空变异规律是制定有效水土保持措施的关键。但目前水土流失时空规律分析鲜有兼顾定量数值特征与空间可视化特征。本研究利用探索性空间分析方法和遥感信息,在景观尺度上,对1994~2003年间浙江安吉县水土流失的时空动态格局进行分析。结果表明,10年间安吉县水土流失强度增加、影响范围扩大、水土流失高风险区面积增加。在500 m×500 m和1 000 m×1 000 m 2种网格尺度上,水土流失空间格局均表现出明显的空间集聚性,但以500 m×500 m尺度上的表现更为显著。这种探索性空间分析方法,从定量的统计学和可视化角度有效地揭示了水土流失的时空变异规律,为相关部门和人员定量评价水土流失,制定有效的水保措施提供了新的方法和手段。

关键词:探索性空间分析; 水土流失; 修正通用水土流失方程(RUSLE); 时空变异; 安吉县
中图分类号:S 157 文献标志码:A 文章编号:1008-9497(2011)06-708-08

JIANG Zhen-lan^{1,2}, SU Shi-liang², JING Chang-wei², LIN Sheng-pan², WU Jia-ping² (1. Department of Geographical Sciences, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Environment and Natural Resources, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Spatio-temporal dynamics of soil loss in Anji County, Zhejiang Province using exploratory spatial data analysis. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2011, 38(6): 708—715

Abstract: Accurate and timely information on spatio-temporal dynamics of soil loss is crucial in making effective soil and water conservation measures. Previous studies, however, rarely characterized quantitatively and spatially the features and patterns of soil loss. This paper reported the spatio-temporal dynamics of soil and water loss during 1994 and 2003 in Anji County, Zhejiang Province using exploratory spatial analysis (Global Moran's I and Local Indicators of Spatial Association) and Landsat information. During the ten years (1994~2003), the County-wide soil erosion was intensified, and the area susceptible to erosion substantially widened. The distribution of soil erosion areas showed an obvious trend of spatial clustering at the 500 m×500 m and 1 000 m×1 000 m resolutions, especially at 500 m×500 m scale. This study provides a new approach for government and relevant officials to understand the spatio-temporal dynamics of soil loss and make counter-measures.

Key Words: ESDA; soil loss; RUSLE; spatiotemporal dynamics; Anji County

0 引言

我国是世界上水土流失最为严重的国家之一,水土流失已成为我国生态环境最突出的问题之一,对我国的生态安全构成严重威胁^[1-3]。为了使水土流失治理建立在科学基础之上,达到快速高效、综合治理的目标,迫切需要全面掌握区域水土流失空间

分布及其变化趋势^[4]。但目前,水土流失时空分异规律分析仅注重水土流失的数值特征^[5-6]或只注重水土流失的空间可视化特征研究^[7-8],缺乏兼顾数值和空间可视化的水土流失空间变异规律研究,尤其是在景观尺度上对空间相关性和空间异质性的定量研究更少。要制定合理有效的水土流失防治措施,管理者和决策者不仅需要了解水土流失时空变化的数

收稿日期:2011-02-25.

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项资助项目(2008ZX07101-006).

作者简介:江振蓝(1976-),女,博士研究生,讲师,主要从事资源与环境遥感研究.

*通信作者,男,教授,博士生导师,主要从事环境信息技术应用、地理空间过程定量与系统模拟模型研究, E-mail: jw67@zju.edu.cn.

值特征^[9],还需要具体了解哪些区域是严重水土流失区、哪些是高风险区域、恶化区域和异常区域等,这些区域是制定政策和具体实施治理措施时应优先考虑的^[10-11].探索性空间数据分析(Exploratory Spatial Data Analysis,ESDA)的方法能较好解决这一问题,它不但可以从定量的统计学,还可以从可视化角度揭示水土流失的时空变异规律.因此,只有兼顾水土流失的时空变异规律数值及可视化分析,才能为管理者和决策者提供科学依据和手段.

ESDA 是空间数据分析(Spatial Data Analysis,SDA)技术的一种,该方法已经广泛应用于空间数据挖掘、数字图像处理、流行病学、自然灾害和区域经济等研究领域^[12-15].但运用 ESDA 空间差异分析方法进行区域水土流失的时空变异规律研究,国内外报道较少.本文以浙江省安吉县为试验区,选择 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 2 种不同格网尺度,利用 ESDA 方法对该县 1994~2003 年间的水土流失状况进行时空变异规律分析,为客观评价分析区域水土流失的时空变异规律提供方法和理论依据.

1 研究区域及数据来源

1.1 研究区概况

安吉县地处太湖西南部,浙江西北部,天目山北麓,位于东经 119°14′—119°53′,北纬 30°23′—30°53′,属于典型的亚热带海洋性季风气候,四季分明,年均温度 15.5℃,年均降水量 1400 mm 左右.全县域面积 1886 km²,人口 45 万.地形呈西南高陡东北低缓的走势,海拔 1587~0 m.安吉生态环境优良,全县森林覆盖率和植被覆盖率分别达到 71%和 75%,境内空气质量为一级,水质在二类以上^[16].

1.2 研究数据及预处理

1994 年 5 月 12 日及 2003 年 3 月 26 日获取的 30 m 空间分辨率的 Landsat Thematic Mapper(TM)影像用于确定地表植被覆盖(C)因子;1:10 000 地形图用于计算坡度坡长(LS)因子;1:50 000 土壤图用于获取土壤可蚀性(K)因子;辅助数据有 1 m 空间分辨率的数字正射影像(DOM, Digital Orthophoto Map),用于辅助遥感影像分类与精度检验.空间数据均采用横轴墨卡托投影(UTM)50N 带,生成的空间数据层均采样成 30 m 的空间分辨率.

2 研究方法

2.1 水土流失量计算

修正型通用土壤流失方程(RUSLE)是目前最常用

的估算水土流失的模型,在世界很多地区得到了广泛的应用^[17-19].其表达式为 $A=R \times K \times LS \times C \times P$,式中, A 为年平均水土流失量($t/km^2 \cdot y$), R 为降水侵蚀力因子($MJ \cdot mm/km^2 \cdot h \cdot y$), K 为土壤可蚀性因子($t \cdot h/MJ \cdot mm$), L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 为地表植被覆盖因子(0~1), P 为水土保持因子(0~1).

本研究借助遥感和地理信息系统(GIS)来获得相关数据,并根据 RUSLE 计算研究区的年均水土流失量.其中, R 因子的确定是利用基于月均降雨量^[20]的算法计算出安吉及附近 11 个站点的 R 值,根据这 11 个站点的 R 值与高程及经度和纬度的乘积进行线性拟合,然后根据拟合方程生成 R 因子图; K 因子的确定是采用基于土壤机械组成及有机质含量^[21]提出的 K 因子估算法; LS 的确定是根据地形因子算法^[22]和 ArcInfo 宏语言^[23](下载网址:www.cwu.edu/~rhckey/slope/slope.html)进行计算; C 因子主要从遥感数据获取.本文综合遥感分类法和线性像元分解法来确定各地类的 C 值;对于空间异质性较小或季节变化大但年际变化小的地表覆盖类型,如居民点、水体、高植被覆盖的林地(>85%)、旱地和水田等,利用遥感影像解译结果,根据前人研究结果赋予不同地表覆盖类型不同的 C 因子值^[24-28];对于空间异质性大或年际变化大但季节变化较小的地表覆盖类型,如稀疏的林地(<15%)、园地、裸地等, C 值的确定主要是在线性像元分解的基础上,利用式(1)计算^[24,29],

$$C = \frac{f_{soil}}{1 + f_{gv} + f_{shade}} \quad (1)$$

其中, f_{soil} 为线性像元分解的土壤分量, f_{gv} 为植被分量, f_{shade} 为水/阴影分量; P 值的确定,由于本研究需要估算的只是水土流失的相对量,假定研究区内土地利用基本上没有采取水土保持措施,故设定 P 值为 1.

利用 GIS 空间分析功能模块,将影响水土流失的各个因子进行空间叠置与算术运算,分别求得研究区 1994 和 2003 年的水土流失量.

水土流失估算精度验证主要是通过实地调查,结合 1 m 分辨率的 DOM 影像、DEM 和土地利用类型图,参照中华人民共和国水利部发布的土壤侵蚀面蚀分级标准和按土壤发生层的侵蚀程度分级标准(SL 190-2007)^[30],对选取的 240 个点进行土壤侵蚀分级,形成土壤侵蚀精度检验的参照数据.然后根据水力侵蚀强度分级标准^[30]对该 240 个点 1994 和 2003 年的水土流失量进行等级划分,运用混淆矩阵和参照数据对其进行精度检验,1994 和 2003 年水土流失估算的总体精度分别为 92.5%和 91.3%,Kappa 系数分别为 0.91,0.90.

为了多尺度多角度探讨水土流失的时空变异规律,分别选择 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 的格网尺度来计算 1994 和 2003 年水土流失量的均值,得到这 2 种尺度下 1994 和 2003 年水土流失空间分布图.将 2003 年水土流失量与相应尺度的 1994 年水土流失量相减,得到相应尺度的水土流失变化图.在水土流失变化图上,水土流失变化量小于 0 的区域表示水土流失正在恢复,为水土流失恢复区,值越小,恢复的程度越好;水土流失变化量大于 0 的区域表示水土流失呈恶化趋势,值越大,恶化的程度越大.

2.2 利用 ESDA 分析水土流失时空变异规律

ESDA 的空间关联测度是利用空间自相关指数来探索自然与社会现象的空间模式和非常态分布.其中,全域指标用于揭示整个研究区域的空间模式,而局域指标用于反映一个区域单元上的某种属性值与邻近区域单元上同一属性值的相关程度.本文利用全局 Moran's I 和局部空间关联指数(Local Indicators of Spatial Association, LISA)作为测度水土流失空间相互依赖水平的指标.通过分析安吉县水土流失的空间自相关性及空间异质性,探测水土流失的热点区域(水土流失严重或恶化的区域),并利用水土流失变化图分析其发展趋势.

2.2.1 全局空间自相关分析

全局空间自相关分析主要是通过 Moran's I 空间自相关统计量分析区域总体上的空间关联和空间差异程度,其计算公式如下:

$$I = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w(i, j)} \times \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w(i, j) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2)$$

式中, N 为总栅格数, x_i 为栅格 i 的水土流失量, \bar{x} 为区域水土流失量的均值,即 $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$, $w(i, j)$ 为空间权重矩阵.本文采用基于距离的空间权重矩阵,分析格网尺度上的水土流失时空变异.

Moran's I 统计量取值范围为 -1 到 1,在给定显著性水平上,若 Moran's I 估计值显著为正,则表示区域水土流失严重(或较轻)的区域在空间上显著集聚;如估计值越趋于 1,区域水土流失程度的总体空间差异就越小;如估计值显著为负,则表明区域与其周边地区水土流失程度具有显著的空间差异,估计值越趋于 -1,区域水土流失的总体空间差异越大.当 Moran's I 值趋于 0 时,水土流失强度在空间上呈随机分布.

2.2.2 局部空间自相关分析

全局 Moran's I 是一种全局的统计指标,不能估计空间自相关中具体区域间的差异程度,也无法解析是否存在局部空间的高度集聚或较低集聚或者各个区域对全局自相关的具体影响程度,而且全局空间自相关很难用于可视化.因此需要运用局部空间自相关分析衡量每个空间要素属性局部的相关性.本文采用基于局部 Moran's I 的 LISA 分析.局部 Moran's I 的计算公式见式(3):

$$I_i = \sum_{j=1}^N W(i, j) (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}), \quad (3)$$

式中各项含义同式(2).LISA 分析不仅计算局部 Moran's I,还对其进行聚类.根据 LISA 聚类结果将水土流失空间分布模式或变化模式分为 4 类:(1)HH(高-高)型.表示区域自身和周边的水土流失程度严重或变化程度较大,区域自身和周边的水土流失空间差异程度较小.即水土流失严重区域被水土流失严重的其他区域、水土流失严重恶化区域被水土流失严重恶化的其他区域所包围.(2)LL(低-低)型.表示区域自身和周边的水土流失程度较轻或变化较小,区域自身和周边的水土流失空间差异程度较小.即水土流失较轻区域被水土流失较轻的其他区域或水土流失恢复区域被水土流失恢复的其他区域所包围.(3)LH(低-高)型.区域自身的水土流失较轻或变化较小,周边区域的水土流失较为严重或变化较大,区域自身和周边的水土流失空间差异程度较大.(4)HL(高-低)型.区域自身的水土流失严重或变化较大,周边地区的水土流失较轻或变化较小,区域自身和周边的水土流失空间差异程度较大.LH 型和 HL 型区域即是研究区水土流失异值点,此类区域较不稳定,LH 型区域容易被周边区域同化,形成水土流失高风险区或变化剧烈的区域(HH 型),HL 型区域由于周边区域的阻碍,水土流失不易向周围扩散,不易产生水土流失高风险区.

在水土流失分布图上,HH 和 LH 型为水土流失高风险区,LL 和 HL 型为水土流失低风险区;在水土流失变化图上,HH 型为水土流失恶化区,LL 型为水土流失恢复区,LH 和 HL 型为水土流失变化异常区.

3 结果与分析

3.1 水土流失的时空特征

从图 1 和 2 可以看出,研究区从 1994~2003 年,水土流失整体上呈恶化趋势,主要表现在两个方面:一是水土流失强度在增强,水土流失分布范围在扩大;二是水土流失恢复区和水土流失恶化区同时存在,但水土流失恶化区要明显大于水土流失恢复区.对图 1 和 2

的统计结果也证实:在 500 m×500 m 尺度,平均水土流失量从 1994 年的 2 844 t/km²·y 增至 2003 年的 3 114 t/km²·y,中度侵蚀(>2 500 t/km²·y)以上的流失区域占区域总面积的比例由 1994 年的 26.8% 上升至 2003 年的 33.5%。水土流失恢复区和恶化区分别占总面积的 29.2%和 50.6%;在 1 000 m×

1 000 m 尺度,全区平均水土流失量从 1994 年的 2789 t/km²·y 增强至 2003 年的 3073 t/km²·y,中度侵蚀(>2 500 t/km²·y)以上的流失区域占全区总面积的比例由 1994 年的 31.7% 上升至 2003 年的 38.1%。水土流失恢复区和恶化区分别占总面积的 34.2%和 54.8%。

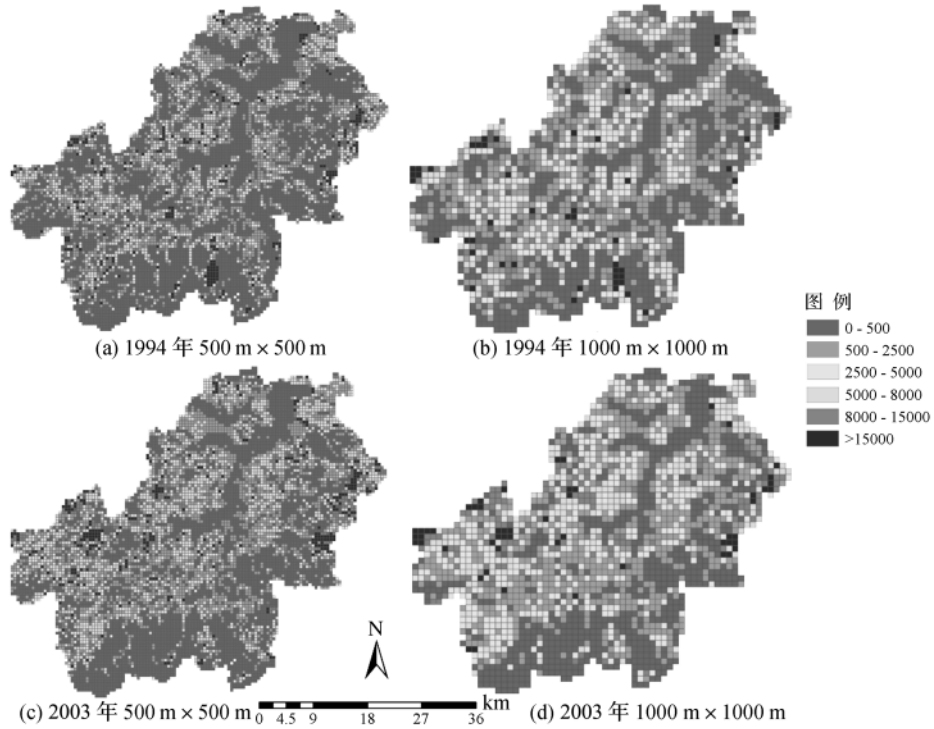


图 1 安吉县 1994 和 2003 年的水土流失分布图(单位: t/km²·y)

Fig.1 Maps of soil loss in Anji County in 1993 and 2004(Unit: t/km²·y)

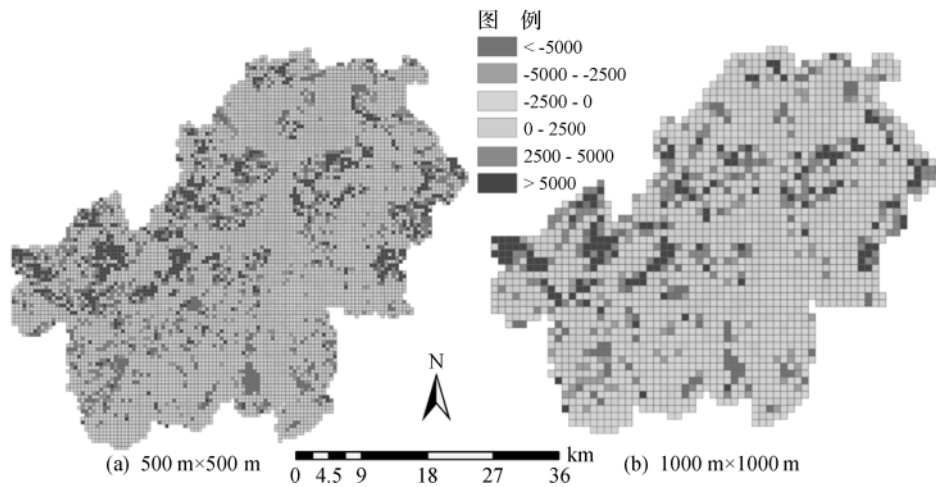


图 2 安吉县 1994~2003 年水土流失变化图(单位: t/km²·y)

Fig.2 Maps of soil loss changes between 1994~2003 in Anji County(Unit: t/km²·y)

3.2 安吉县水土流失全局自相关分析

计算 1994、2003 年、1994~2003 年水土流失的全局空间自相关指数 Moran's I(显著性水平 $P=0.05$)。其中,1994 年在 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 尺度上的 Moran's I 分别为 0.494 和 0.442;2003 年在

500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 尺度上的 Moran's I 则分别为 0.504 和 0.553;表明这 2 个年份的水土流失存在较为明显的正自相关(空间依赖性强),也就是研究区水土流失的空间分布表现出较为明显的空间集聚,并呈现出正的空间相关特征,即水土流失严重(或

较轻)区域相互邻近. 1994~2003 年间不同尺度上的 Moran's I 均呈增长趋势, 表明水土流失的空间自相关显著性在逐渐增强, 水土流失集聚程度增强, 水土流失问题越来越成为全局性的问题. 比较 1994~2003 年水土流失变化的 Moran's I, 在 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 尺度上分别为 0.450 和 0.394, 说明水土流失恶化(或恢复)区域呈较为集中的分布.

3.3 安吉县水土流失局部自相关分析

从水土流失局部空间关联指数(LISA)分类图可以看出, LH 型和 HL 型(区域水土流失异常值区域)基本沿 LL 型区域(低风险水土流失区)或 HH 型区域(高风险水土流失区)外围呈斑点状零星分布, 所占比重较小(见图 3). LL 型区域主要分布在南部的山区及北部的平原地区. 2003 年 LL 型基本上沿着 1994 年的 LL 型区域向外扩展, 该类型所占比重最大. HH 型在 1994 年全县大部分区域呈零散分布, 规模较小; 而 2003 年 HH 型主要集中在安吉的中西部和东部丘陵地区, 呈较大规模的连片分布. 从 1994~2003 年变化的 LISA 分类图可以看出, HH 型区域(水土流失恶化区)主要集中在安吉中部丘陵地区成片分布, LL 型区域(水土流失恢复区)主要集中在南部的山区及北部的平原区, 水土流失恶化区明显大于水土流失恢复区.

险水土流失区)外围呈斑点状零星分布, 所占比重较小(见图 3). LL 型区域主要分布在南部的山区及北部的平原地区. 2003 年 LL 型基本上沿着 1994 年的 LL 型区域向外扩展, 该类型所占比重最大. HH 型在 1994 年全县大部分区域呈零散分布, 规模较小; 而 2003 年 HH 型主要集中在安吉的中西部和东部丘陵地区, 呈较大规模的连片分布. 从 1994~2003 年变化的 LISA 分类图可以看出, HH 型区域(水土流失恶化区)主要集中在安吉中部丘陵地区成片分布, LL 型区域(水土流失恢复区)主要集中在南部的山区及北部的平原区, 水土流失恶化区明显大于水土流失恢复区.

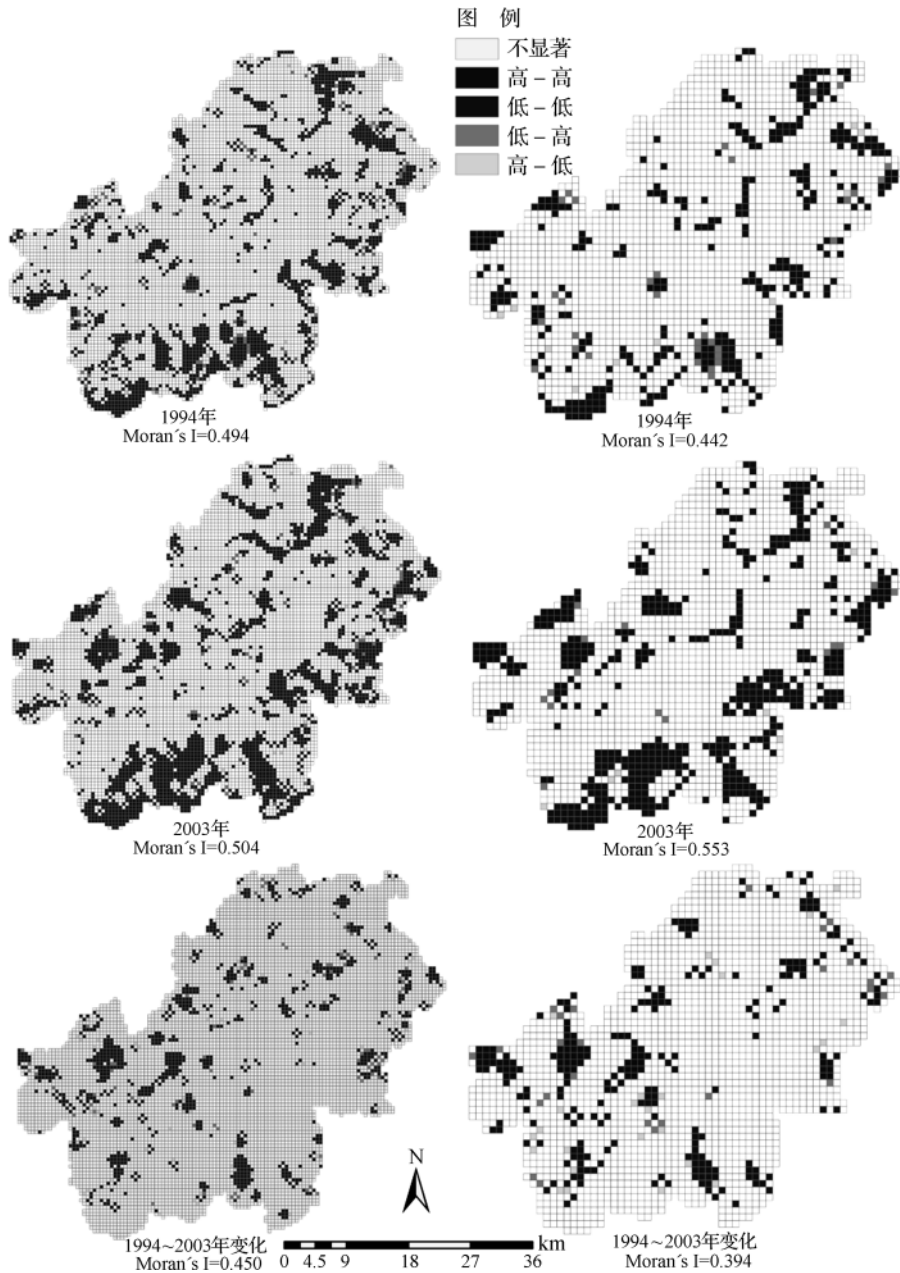


图 3 水土流失热点区域空间分布模式(左边一栏为 500 m×500 m 尺度;右边一栏为 1 000 m×1 000 m 尺度)
 Fig. 3 Spatial patterns of soil loss hotspots in Anji County(Each block in the left row represents 500 m×500 m grid and each block in the right represents 1 000 m×1 000 m grid)

由表 1 可见,不论在 500 m×500 m 还是 1 000 m×1 000 m 尺度上,HH 型和 LL 型区域面积均在扩展,且 HH 型区域扩展速度远快于 LL 型区域. 2003 年,在 500 m×500 m 尺度上 HH 型区域为 1994 年的 1.67 倍,LL 型区域为 1.18 倍;在 1 000 m×1 000 m 尺度上,2003 年 HH 型区域为 1994 年的 1.69 倍,LL 型区域为 1.41 倍.LH 型和 HL 型区域呈下降趋势,这也证实了这两种类型区域容易被周边区域同化,从而转化

成 HH 型区域或 LL 型区域. 1994~2003 年水土流失变化的 HH 型与 LH 型的比重均大于 LL 型与 HL 型的区域,这说明 1994~2003 年期间,安吉县水土流失呈现加重趋势,水土流失热点区域在不断扩大:在 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 尺度上,1994 年水土流失高风险区(包括 HH 型和 LH 型)分别占区域总面积的 6.13% 和 6.15%,但 2003 年,占到了 9.03% 和 8.54%.

表 1 水土流失局部 Moran's I 聚类统计

Table 1 Spatial clusters of soil loss as expressed with Local Moran's I

年份	500 m×500 m 尺度/%				1 000 m×1 000 m 尺度/%			
	HH 型	LL 型	LH 型	HL 型	HH 型	LL 型	LH 型	HL 型
1994	4.64	16.38	1.49	0.28	4.60	11.83	1.55	0.48
2003	7.74	19.31	1.29	0.23	7.76	16.63	0.78	0.29
1994~2003 变化	6.88	4.38	1.05	0.83	7.27	5.04	1.26	1.26

4 结论与讨论

研究认为 1994~2003 年间,安吉县水土流失呈现增强趋势,受水土流失影响范围越来越大. 该区域的水土流失表现为水土资源破坏与水土流失治理并存,但水土资源破坏的强度大于治理的力度,使得水土流失在总体上呈恶化趋势,水土流失已成为影响该区域的重要生态环境问题. 治理和破坏的区域呈现较为集中的态势,这主要是由人类活动造成的. 该县南部山区和北部的平原区,由于水土流失得到了治理,表现出较为集中的恢复区,而中部丘陵地区土地利用类型主要以毁林开采、占用林地为主,水土流失呈现出恶化的趋势,这已成为安吉县水土流失恶化的主要原因. 作为中国首个生态县,政府积极倡导发展生态经济——生态农业(安吉白茶)和生态工业(竹子产业),但如何平衡经济发展和保持和谐的生态环境,实现真正的可持续发展,是安吉县乃至广大农村地区当前和今后急需认真思考和妥善解决的一大难题.

ESDA 运用空间自相关分析,有效地融合了统计与空间的关系,不仅从统计学也从可视化角度揭示了水土流失的时空变异模式,探索了水土流失的热点区域,为水土流失的科学治理提供了翔实可靠的资料,为客观分析水土流失的时空变异规律提供了可靠的方法,这是传统的空间分析模型或统计模型所无法实现的. 但景观尺度的水土流失的研究数据多依赖于各种图形和影像资料,水土流失演变规律研究结果与遥感数据的空间分辨率和获取时相有很大的关系,影像的质量和解释方法会直接影响土

地利用分类结果的精度,继而影响水土流失估算结果的准确性. 对这一问题今后还需借助影像融合、DEM 辅助分类、面向对象分类等技术,通过提高土地利用自动分类精度来提高研究精度.

水土流失时空格局和变异规律都依赖所观测的时间和空间尺度,不同时空尺度下,水土流失演变具有不同的表现特征和动力机制^[31]. 在某一时间尺度下,大空间尺度上水土流失变化往往不易发现,而具体到某一地块上这种变化就清晰可见^[32]. 同样,在同一空间尺度下水土流失格局变化速率、方向和影响随时间尺度而异,非常短或非常长的时间段都有可能掩盖水土流失变化的真实情况^[33]. 本研究以 1994~2003 年 10 年的时间尺度为研究时段,以 500 m×500 m 和 1 000 m×1 000 m 为研究空间尺度,尽管在一定程度上揭示了研究对象在一定时段的变化规律,但由于所选择的时空尺度较为单一,致使对水土流失演变的时间和空间特征的分析不够深入. 因此,对于水土流失信息如何随着空间尺度的变化而变化,在什么尺度下,获取的水土流失信息精度最高,或什么样尺度的水土流失信息能最真实反映管理者和决策者所关心的水土流失时空过程,有待在今后的研究中做进一步的探讨.

参考文献(References):

- [1] FU B J. Blue skies for China[J]. *Science*, 2008, 321(5889): 611.
- [2] 张登荣,赵元洪. 水土流失强度遥感快速调查方法[J]. *浙江大学学报:自然科学版*, 1997, 31(6): 753-759.
ZHANG Deng-rong, ZHAO Yuan-hong. The fast detection method of soil erosion by using remotely sensed

- data[J]. *Journal of Zhejiang University: Natural Science*, 1997, 31(6): 753—759.
- [3] 张登荣, 朱建丽, 徐鹏炜. 基于卫星遥感 GIS 技术的水土流失动态监测体系研究[J]. *浙江大学学报: 理学版*, 2001, 28(5): 577—582.
ZHANG Deng-rong, ZHU Jian-li, XU Peng-wei. Research of dynamic monitoring system for soil erosion by satellite remote sensing and GIS technique [J]. *Journal of Zhejiang University: Science Edition*, 2001, 28(5): 577—582.
- [4] 沈中原, 李占斌, 杜中, 等. 大理河流域土壤侵蚀空间分布的地貌特征研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(5): 78—81.
SHEN Zhong-yuan, LI Zhan-bin, DU Zhong, et al. Study on topographic characters of soil erosion spatial distribution in Dalihe watershed on Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(5): 78—81.
- [5] 徐旌, 张军, 刘燕, 等. 基于 RS, RIS 的滇池流域水土流失变化研究[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 80—83.
XU Jing, ZHANG Jun, LIU Yan, et al. Study on change of soil erosion in Dianchi Lake basin based on RS and GIS[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 80—83.
- [6] 岳书平, 闫业超. 定量遥感支持下的磐石市土壤侵蚀动态监测[J]. *水土保持通报*, 2009, 29(6): 126—130.
YUE Shu-ping, YAN Ye-chao. Soil erosion dynamic detection in Panshi city based on quantitative remote sensing[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(6): 126—130.
- [7] 陈修颖, 叶华, 李超群. 洞庭湖流域花岗岩地区的水土流失特征及其防治对策[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 72—76, 84.
CHEN Xiu-ying, YE Hua, LI Chao-qun. Features of soil erosion in granite region of Dongting Lake drainage basin[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 72—76, 84.
- [8] 罗利芳, 张科利, 孔亚平, 等. 青藏高原地区水土流失时空分异特征[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(1): 58—62.
LUO Li-fang, ZHANG Ke-li, KONG Ya-ping, et al. Temporal and spatial distribution of soil loss in Tibet-Qing plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 58—62.
- [9] 邹爱平, 陈志彪, 陈志强. 水土流失景观空间自相关与自相似的尺度特征分析——以长汀县根溪河小流域为例[J]. *国土与自然资源研究*, 2007, 3: 31—33.
ZOU Ai-ping, CHEN Zhi-biao, CHEN Zhi-qiang. Scaling analyses of spatial autocorrelation and self-similarity of soil and water loss landscape pattern—A case study of the small watershed of Genxi River, Changting County[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2007, 3: 31—33.
- [10] MASOUDI M, PATWARDHAN A M, GORE S D. Risk assessment of water erosion for the Qareh Aghaj subbasin, southern Iran[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2006, 21(1): 15—24.
- [11] RAHMAN M R, SHI Z H, CHONGFA C. Soil erosion hazard evaluation—An integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies [J]. *Ecological Modelling*, 2009, 220 (13—14): 1724—1734.
- [12] Le GALLO J, ERTUR C. Exploratory spatial data analysis of the distribution of regional per capita GDP in Europe, 1980—1995 [J]. *Papers in Regional Science*, 2003, 82, 175—201.
- [13] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93—115.
- [14] 蒲英霞, 葛莹, 马荣华, 等. 基于 ESDA 的区域经济空间差异分析——以江苏省为例 [J]. *地理研究*, 2005, 24(6): 965—974.
PU Ying-xia, GE Ying, MA Rong-hua, et al. Analyzing regional economic disparities based on ESDA [J]. *Geographical Research*, 2005, 24(6): 965—974.
- [15] 程叶青, 邓吉祥, 房艳刚. 吉林省中部粮食主产区城乡关联的空间分析 [J]. *地理研究*, 2010, 29(4): 727—736.
CHENG Ye-qing, DENG Ji-xiang, FANG Yan-gang. Spatial analysis of urban-rural association to the major grain-producing areas of central Jilin Province [J]. *Geographical Research*, 2010, 29(4): 727—736.
- [16] 于立. 创立一个中国式的生态发展模式: 安吉研究 [J]. *城市发展研究*, 2009, 16(10): 86—91.
YU Li. Creating an Chinese ecological development model: Anji case study [J]. *Urban Studies*, 2009, 16(10): 86—91.
- [17] RENARD K G, FOSTER G R, WEESIES G A, et al. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)* [M]. Washington: US Department of Agriculture, 1997.
- [18] ISMAIL J, RAVICHANDRAN S. RUSLE2 model application for soil erosion assessment using remote sensing and GIS [J]. *Water Resources Management*, 2008, 22(1): 83—102.
- [19] XU Y Q, SHAO X M, KONG X B, et al. Adapting the RUSLE and GIS to model soil erosion risk in a

- mountains karst watershed, Guizhou Province, China [J]. **Environment Monitor Assessment**, 2008, 141, 275—286.
- [20] RENARD K G, FREIMUND J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE[J]. **Journal of Hydrology**, 1994, 157(1—4): 287—306.
- [21] WILLIAMS J R, JONES C A, DYKE P T. A Modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity[J]. **Transactions of the Asae**, 1984, 27(1): 129—144.
- [22] WISCHMEIER W H, SMITH D D. **Predicting Rainfall Erosion Losses—A Guide to Conservation** [M]. Washington: US Department of Agriculture, 1978.
- [23] Van REMORTEL R D, MAICHLE R W, HICKEY R J. Computing the LS factor for the Revised Universal Soil Loss Equation through array-based slope processing of digital elevation data using a C++ executable[J]. **Computers & Geosciences**, 2004, 30(9—10): 1043—1053.
- [24] De ASIS A M, OMASA K. Estimation of vegetation parameter for modeling soil erosion using linear Spectral Mixture Analysis of Landsat ETM data[J]. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, 2007, 62(4): 309—324.
- [25] De VENTE J, POESEN J, GOVERS G, et al. The implications of data selection for regional erosion and sediment yield modelling[J]. **Earth Surface Processes and Landforms**, 2009, 34(15): 1994—2007.
- [26] DI B F, ZHENG H J, ZHANG M H, et al. Quantifying the spatial distribution of soil mass wasting processes after the 2008 earthquake in Wenchuan, China A case study of the Longmenshan area[J]. **Remote Sensing of Environment**, 2010, 114(4): 761—771.
- [27] FU B J, ZHAO W W, CHEN L D, et al. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: A case study in the Loess Plateau of China[J]. **Land Degradation & Development**, 2005, 16(1): 73—85.
- [28] SHI Z H, CAI C F, DING S W, et al. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China[J]. **Catena**, 2004, 55(1): 33—48.
- [29] LU D, LI G, VALLADARES G S, et al. Mapping soil erosion risk in Rondonia, Brazilian Amazonia: Using RUSLE, remote sensing and GIS[J]. **Land Degradation & Development**, 2004, 15(5): 499—512.
- [30] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准 [M]. 北京: 中国水利水电出版, 2007. Ministry of Water Resources, PRC. **National Professional Standards for Classification and Gradation of Soil Erosion (SL190—2007)** [M]. Beijing: China Hydraulic and Hydropower Press, 2007.
- [31] 王计平, 陈利顶, 汪亚峰. 黄土高原地区景观格局演变研究综述[J]. **地理科学进展**, 2010, 29(5): 535—542. WANG Ji-ping, CHEN Li-ding, WANG Ya-feng. Research on landscape pattern change in Loess Plateau: current status, issues and trends[J]. **Progress in Geography**, 2010, 29(5): 535—542.
- [32] 陈佑启, 何英彬. 论土地利用/覆盖变化研究中的尺度问题[J]. **经济地理**, 2005, 25(2): 152—155. CHEN You-qi, HE Ying-bin. Scale issues in the analysis of land use/cover change[J]. **Economic Geography**, 2005, 25(2): 152—155.
- [33] 倪绍祥. 土地利用/覆被变化研究的几个问题[J]. **自然资源学报**, 2005, 20(6): 932—937. NI Shao-xiang. Some issues in the study on land use/cover change[J]. **Journal of Natural Resources**, 2005, 20(6): 932—937.

(责任编辑 寿彩丽)