

苏锡常地区土地利用变化时空分异 及其生态环境响应

涂小松, 濮励杰

(南京大学地理与海洋科学学院 国土资源与旅游学系, 南京 210093)

摘要: 以苏州、无锡和常州所辖市(区)为分析单元, 揭示土地利用变化的时空分异特征, 结合对该区域生态环境状况的评价, 重点分析土地利用变化时空分异的生态环境响应。结果表明: 1980~2000 年苏锡常地区土地利用变化的主导类型是城乡建设用地大量扩张和耕地资源急剧减少, 土地利用变化类型趋于多样化; 土地利用结构存在不同程度的空间差异性, 土地利用有序性和综合变化速度也具有明显的空间分异特征, 土地利用系统趋向于复杂无序和加速演化; 区域多数单元的生态环境状况不断变差, 且对土地利用变化时空分异具有明显的响应特征; 生态环境状况对土地利用有序性和综合变化速度的响应程度具有明显的区域差异性, 而且这种响应和差异性程度都有所加强。

关键词: 土地利用变化; 生态环境; 时空分异; 苏锡常地区

文章编号: 1000-0585(2008)03-0583-12

1 引言

城市化是人类对土地利用的重要作用方式之一^[1]。受主客观因素的影响, 在城市化进程中土地利用往往表现为林地、草地、耕地和水域等向城乡建设用地加速转化^[2~4], 并伴随着区域社会、经济和生态环境条件的进一步变化^[5]。最为明显的特征是具有生态环境保护功能的用地不断减少, 从而导致土地生态环境压力持续增加, 这种现象在快速城市化地区表现得尤为突出^[6]。近年来许多地区发生的一系列生态环境问题, 更是引发了人们对人类活动所引起的土地利用变化及其生态环境响应的深刻反思和广泛关注^[7~9]。学者们已就土地利用变化对区域生态环境、土壤质量、沙漠化等方面的影响开展了大量研究工作^[10~12]; 同时经过长期探索, 认为地域分异及地方性分异研究可以作为土地利用研究的主要任务和有效手段, 如: 土地利用变化规律与趋势的地域分异^[13,14], 土地利用地域分异的成因与机理^[15], 或把土地利用结构的地域分异作为其他现象或规律的成因乃至影响因素进行研究^[16~19]。尽管这些研究从不同侧面揭示了土地利用变化及其生态环境响应特征方面的诸多科学问题, 但从时空分异角度, 综合考查土地利用变化的动态差异性和生态环境状况的时空特征、系统地探讨土地利用变化对生态环境的影响还有待进一步研究。本文试图就此做一些探索, 以期服务于区域生态建设、环境保护、功能区划和土地利用

收稿日期: 2007-08-05; 修订日期: 2008-01-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(40371106); 江苏省研究生科研创新计划(CX07B_042z); 江苏省自然科学基金项目(KB2005080)。

作者简介: 涂小松(1977-), 男, 江西德安人, 博士生。主要从事土地评价与土地利用规划研究。

E-mail: txsnju@yahoo.com.cn

管理。

苏州、无锡、常州（简称苏锡常地区，SXC）紧靠沪、宁、杭，位于长江三角洲的核心区域，具体范围在 $119^{\circ}7' \sim 121^{\circ}23'E$ 、 $30^{\circ}45' \sim 32^{\circ}2'N$ 。区域自然条件优越，开发历史悠久，经济实力雄厚，是江苏省乃至全国生产力布局的重点地区和基本经济区。随着工业化、城镇化的不断发展和人口的快速增长，该地区人地矛盾、人与空间的不协调状态日益严重，经济高速发展和快速城市化给区域生态环境带来了许多负面影响^[20]。可以说苏锡常地区是全国改革开放发展历程中的一个触角，选取该地区开展土地利用变化时空分异及其生态环境响应研究，具有典型代表性和重要实践意义。

2 研究数据与研究方法

2.1 数据来源与处理

选取苏州、无锡和常州下辖的 12 个市（区）为分析单元（如图版 4 图 1），行政总面积为 17513km^2 。分析时段为 1980~2000 年，其中前 10 年地区经济总量和社会投资水平相对较低，而随着改革开放的深入推进，尤其是外资企业大量进驻，“八五”期间 GDP 和社会投资都进入高速增长期，并直接驱动土地利用格局加速演变。而 1995 年以后又进入宏观调控的关键时期，土地利用格局也表现出不同的演变特征。因此以 1995 年为时段分界点，土地利用数据来源于 Landsat TM 影像，获取时间分别为 1980 年 10 月 13 日、1995 年 11 月 18 日和 2000 年 10 月 8 日，空间分辨率为 $30\text{m} \times 30\text{m}$ 。其他数据源于《江苏五十年》、《江苏省农用地资源分等研究》等统计调查资料。

遥感影像预处理主要包括相对辐射校正、几何纠正、面积提取等^[21]。以研究区 1996 年的地形图为准，采用三次多项式对 3 个时相的遥感影像进行几何纠正，经重新选点检验，配准误差在一个象元之内。再以 2000 年遥感影像为标准，采用 SCR（Scatter-gram Controlled Regression）方法，以一次线性回归的形式对 1980 年和 1995 年的遥感影像进行简易标准化处理。在此基础上根据《全国土地分类》（过渡期间适用）及研究区实际情况，将土地利用类型重分为水田、旱地、林地、草地、河流湖泊、其他水域、城镇及工矿用地等、农村居民点用地和未利用地 9 类。参考同期的地面数据，随机选取若干样本区域，计算分类误差矩阵和 kappa 系数，对最后得到的土地利用结果图进行精度检验，3 个时相的综合分类精度依次达到 79.05%、88.28% 和 89.54%，各类用地 kappa 系数也都超出最低允许判别精度 70% 的要求。虽然分类精度仍可能会对下文有关指标的计算造成相应的不确定性影响，但这并不影响各指标对土地利用时空分异特征的表达。此后进一步分单元统计相应的土地面积及结构，通过栅格计算得到 2 个时段土地利用变化主导类型数据（图版 4 图 1）。土地利用生态环境压力指标需要经过标准化处理，本文采取极差标准化法。

2.2 研究方法

2.2.1 土地利用变化时空分异分析方法 土地利用变化时空分异在很大程度上都反映于土地利用结构的时空分异，本文主要采用计量经济学和景观生态学中有关数量分析方法，进行土地利用时空分异的定量分析。分析指标和计算方法如下：

（1）土地利用结构差异度系数 D_j 欧氏距离系数是度量 n 维空间两点之间距离（差异）的常用系数之一，这里尝试构建反映土地利用结构差性的欧氏距离系数 D_j ，将其用于衡量土地利用结构变化的时空分异程度， $D_j \geq 0$ ，值越大，结构差异性越大。

$$D_j = \sqrt{\sum_{i=1}^m (P_{xi} - P_{yi})^2} \quad (1)$$

式中: i 为土地类型, P_{xi} 和 P_{yi} 分别为 x 区域和 y 区域 i 类用地所占比重, j 表示时相。

(2) 土地利用结构信息熵 H_j 土地利用系统是一个复杂的综合系统, 其内部结构的有序性可以用信息熵表示^[22,23], 土地利用类型越多且比例越平均, 熵值越大, 系统越复杂无序。这里在计算该指标的基础上, 进一步求算不同时期土地利用结构信息熵的年均变化率 λ , 用以分析土地利用系统有序性的动态分异。

$$H_j = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{1}{n} \left(\frac{H_{j+1}}{H_j} - 1 \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: P_i 表示某单元第 i 种土地利用类型所占比重, m 为土地利用类型数, n 为期间年度间隔, j 为时相。

(3) 土地利用类型综合转换速率 V 土地利用/覆被变化的实质是区域内不同用地类型间的相互转换, 这里用年均综合转换速率系数表示。它有效综合了单元内各种用地类型的变化速度信息, 且考虑了单元土地面积总量及结构因素, V 的大小影响着区域生态环境状况的稳定性。

$$V = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i^{(j+1)} - A_i^{(j)}}{A_i^{(j)}} \right)^2 \cdot \frac{A_i^{(j)}}{S}} \quad (4)$$

式中: $A_i^{(j)}$ 表示 j 时期第 i 类用地面积, S 表示某单元土地总面积, 其他同上。

2.2.2 土地利用变化生态环境响应分析方法 土地利用变化往往直接导致区域植被覆盖、生物丰度和土壤条件等生态环境因素的变化^[24]。本文以国家环保总局制定的《生态环境状况评价技术规范(试行)》(以下简称“规范”)为基础, 根据区域实际情况对其作适当调整, 用来定量评价和比较区域生态环境状况, 并进一步与土地利用时空分异的有关量化指标相结合, 综合分析土地利用变化时空分异的生态环境响应。

(1) 生态环境状况评价指标体系与方法 根据《规范》, 生态环境指标体系分为 4 个层次, 即目标层、准则层、指标层和分指标层。目标层为生态环境状况指数 EI, 准则层包括生物丰度 BR、植被覆盖 VC、水网密度 WD、土地退化 LD、环境质量 EQ 等 5 大指数, 由指标层和分指标层进一步解释。这里仅对文章调整部分作简要说明, 其他权重设置与指标计算等内容参见《规范》。具体调整如下: ①研究区水资源量比较丰富, 且总量变化并不大, 因此去除水网密度指数下的水资源量指标, 相应的河流密度和湖库密度指标权重分别调整为 0.4 和 0.6; ②将环境质量指数下的 SO_2 和 COD 分别替换为工业废水排放量和工业废气排放量, 权重遵照《规范》; ③考虑到研究区土地退化程度极轻, 将其权重由《规范》中的 0.2 适当下调至 0.15, 而将植被覆盖指数权重调整为 0.25。各指标都进行了极大值标准化处理, 使 EI 值的计算消除了量纲的影响。但在上述土地分类精度和调查数据可靠性范围内, 分析单元的地表覆盖状况是确定的, 因而计算结果也具有确定性。

生态环境状况评价方法与《规范》基本一致, 主要对土地退化指数计算作了调整, 使得农地侵蚀面积越小, 指数值越大, EI 指数也越大, 公式如下:

$$LD = 100 - A(0.05S_1 + 0.25S_2 + 0.7S_3)/S \quad (5)$$

式中: A 为土地退化指数的归一化系数, S_1 、 S_2 和 S_3 分别为轻度、中度、重度农地

侵蚀面积, S 为单元总面积。

(2) 土地利用变化的生态环境响应系数 ERH 和 ERV 弹性理论是经济学中研究因变量相对变化对自变量相对变化的反应程度或灵敏程度的理论。本文所探讨的土地利用变化生态环境响应, 是一种现象的时空变化相对于另一种现象时空变化的反应, 如果将这些现象的时空变化都量化, 即可类似于经济学中的弹性。这里分别构建区域生态环境状况的土地利用结构信息熵弹性系数(ERH)和土地利用综合变化弹性系数(ERV), 用于定量分析土地利用变化时空分异的生态环境响应。上述 λ 和 V 分别是衡量土地利用有序性和土地利用类型综合变化情况的相对性指标, 作为自变量相对变化指标; 同理可以计算 EI 的年均变化速度作为因变量相对变化指标。指数 ERH 和 ERV 的计算公式如下:

$$ERH = \frac{(EI_{j+1} - EI_j) \times 100\%}{\lambda \cdot n \cdot EI_j} \quad (6)$$

$$ERV = \frac{(EI_{j+1} - EI_j) \times 100\%}{V \cdot n \cdot EI_j} \quad (7)$$

式中: EI_j 表示 j 时期生态环境状况指数, 其他同上。 ERH 指数代表生态环境状况(EI)相对变化对土地利用有序性相对变化 λ 的响应程度, 指数为正, 说明土地利用有序性朝着改善区域生态环境的方向发展, 指数值越大, 生态环境对土地利用有序性的响应特征越明显。 ERV 指数代表生态环境状况相对变化对土地利用类型综合转换速度 V 的响应程度, 指数为正, 说明土地利用类型的综合转换有利于区域生态环境的改善, 指数值越大, 生态环境对土地利用变化速度的响应特征越明显, 反之亦然。

3 苏锡常地区土地利用变化时空分异分析

3.1 土地利用变化的总体特征

改革开放后的 20 多年时间里, 在“苏南模式”的带动下, 苏锡常地区的农村工业化和市场化实现了巨大变革, 伴随而来的是城乡建设用地迅速扩张和耕地急剧减少。从三期遥感监测数据分析结果来看(图版 4 图 1, 表 1), 该地区土地利用变化具有如下主要特征: 土地利用变化类型趋于多样化, 且水田流失比例进一步增加, 耕地被占用现象日益严重; 城镇及工矿用地扩张主要集中在地区社会、经济和文化中心(苏州、无锡和常州市区), 三个市区的人口、GDP、工业总产值和全社会固定资产投资额分别占研究区的 46%、51%、51%和 59%, 而土地面积仅占研究区的 39%, 其中还包括大部分的太湖水域, 巨大的社会经济发展动力是驱使该地区建设用地迅速扩张的主要原因^[21]; 上世纪 90 年代初, 以苏锡常为核心的区域经济结构逐渐形成, 产业活动表现为由集聚向扩散过渡, 城市化进程进一步加快, 区域发展的内外部合力推动和加速了城市更新^[25], 促使区域城镇及工矿用地扩张趋于分散化, 1995~2000 年间张家港、江阴、常熟等沿江城市和紧邻上海的昆山市的城镇及工矿用地扩张规模急剧增加(占该时段扩张规模的 37.93%); 尽管采取了诸如撤村并点等积极措施, 但快速城市化在驱动城镇用地迅速扩张的同时, 并没能有效控制农村居民点用地的扩张, 相反各地农村居民点占用耕地特别是水田现象却更为严重, 其分布特征还表明, 受大城市的辐射作用越强, 这种现象越明显; 此外, 一些区域在农业结构调整时, 将部分邻近水域的水田改造为水塘, 促进了农业的多样化经营, 但同时也可能影响到区域生态环境。

表 1 1980~2000 年苏锡常地区土地利用变化主导类型及其区域分布特征 (%)

Tab. 1 The dominant type of land use change and its regional distribution characteristics in the Suzhou-Wuxi-Changzhou (SXC) region (1980~2000) (%)

主导类型	1980~1995 年			1995~2000 年		
	比重	标准差	分布特征与主要区域	比重	标准差	分布特征与主要区域
水田转为农村居民点	36.85	4.89	各区域较均匀分布, 前三位是常州市区、江阴和无锡市区。	38.77	6.42	各区域较均匀分布, 前三位是苏州市区、吴江和常州市区。
水田转为城镇及工矿	31.85	5.07	各区域较均匀分布, 无锡、常州和苏州市区分别前三位。	30.24	6.43	各区域较均匀分布, 前三位是苏州市区、昆山和张家港市。
水田转为水域	4.92	10.62	集中分布于昆山、溧阳两市。	9.57	12.97	集中分布于吴江和苏州市区。
旱地转为城镇及工矿	20.01	9.28	集中分布于常州、苏州、无锡三市区。	4.42	8.90	较集中分布于无锡市区、常熟市和苏州市区。
旱地转为农村居民点	4.09	10.84	常熟约占四成, 其余主要分布在张家港、金坛、溧阳和宜兴。	4.16	12.41	集中分布于宜兴市、无锡市区和常熟市。
林地转为城镇及工矿	少量	—	—	2.99	11.98	集中分布于江阴、苏州市区和宜兴。
林地转为农村居民点	少量	—	—	2.84	14.14	集中分布于苏州市区和宜兴市。

注：表中仅列出比重大于 0.8% 的主要类型。比重为所指转换类型占所有转换面积的比重，表明该类转换在对应时期土地利用类型转换中的份额；标准差以各单元所指转换类型面积为样本计算依据，表明类型转换的区域分异程度。

3.2 土地利用变化时空分异的定量分析

3.2.1 土地利用差异性 根据式 (1) 计算各单元的 D_j 如表 2 所示，按照 D_j 的整体水平及

表 2 1980 年，2000 年苏锡常地区土地利用结构差异性的欧氏距离系数

Tab. 2 The Euclidian distance coefficient of diverse land use composition in the SXC region (1980, 2000)

	苏州 市区	常熟	张家港	昆山	吴江	太仓	无锡 市区	江阴	宜兴	常州 市区	溧阳	金坛
	1980年 →											
苏州市区	0.000	0.542**	0.564**	0.695**	0.544**	0.558**	0.414*	0.683**	0.471**	0.606**	0.626**	0.549**
常熟	0.532**	0.000	0.087	0.234*	0.147	0.201*	0.153*	0.200*	0.239*	0.118	0.212*	0.122
张家港	0.540**	0.072	0.000	0.160*	0.121	0.122	0.170*	0.149	0.284*	0.073	0.281*	0.193*
昆山	0.648**	0.186*	0.138	0.000	0.194*	0.158*	0.308*	0.094	0.396*	0.134	0.381*	0.314*
吴江	0.538**	0.135	0.124	0.148	0.000	0.177*	0.169*	0.182*	0.259*	0.104	0.303*	0.197*
太仓	0.544**	0.191*	0.133	0.150	0.178*	0.000	0.214*	0.192*	0.353*	0.162*	0.391*	0.302*
无锡市区	0.403*	0.161*	0.157*	0.273*	0.190*	0.222*	0.000	0.278*	0.194*	0.200*	0.292*	0.195*
江阴	0.657**	0.179*	0.145	0.103	0.180*	0.202*	0.264*	0.000	0.350*	0.098	0.324*	0.270*
宜兴	0.470**	0.228*	0.264*	0.343*	0.251*	0.341*	0.199*	0.327*	0.000	0.286*	0.210*	0.166*
常州市区	0.585**	0.113	0.081	0.111	0.112	0.175*	0.191*	0.086	0.270*	0.000	0.275*	0.195*
溧阳	0.630**	0.217*	0.275*	0.338*	0.296*	0.382*	0.310*	0.312*	0.213*	0.279*	0.000	0.118
金坛	0.551**	0.124	0.183*	0.261*	0.189*	0.290*	0.217*	0.254*	0.168*	0.196*	0.118	0.000

说明：根据 D_j 的平均值和极值情况，将各单元间 D_j 划分为微小差异 ($0 < D_j \leq 0.15$, 无上标)、一般差异 ($0.15 < D_j \leq 0.45$, 上标*) 和明显差异 ($D_j > 0.45$, 上标**) 三类；加粗部分为 2000 年 D_j 值高于 1980 年相应值的单元。

其极值情况,分为3个差异性级别。两个时期大多数单元之间土地利用都表现为“一般差异”,1980年有43对两两组合单元属于此类情况,“微小差异”组合13对,“明显差异”组合10对;2000年相应值分别为40对、16对和10对。

虽然不同单元间存在一定的土地利用差异性,但这种差异性呈现逐渐缩小的态势。苏州市区范围内有超过一半的面积为太湖水域(占54%以上),耕地比重相对较低,同其他单元耕地主导型的土地利用结构相比,具有明显差异,与其相关的 D_j 平均值1980年为0.568,2000年为0.554;尽管以耕地为主,但无锡市区的水域比重也较高,加之城镇及工矿用地和农村居民点用地对耕地的占用规模较大,因此从 D_j 来看,其土地利用结构与其他单元间也具有较大的差异性,无锡市区是与苏州市区土地利用结构最相似的区域;与这两个区域具有显著差异的是昆山、江阴、溧阳和常州市区,这些区域有的是耕地占绝对比重,有的是林地比重大。从对 D_j 的纵向比较来看,苏锡常地区土地利用结构的区域差异性具有逐渐缩小趋势。一方面表现为“一般差异”组合数量的减少和“微小差异”组合数量的增加;另一方面由表2可以更直观看出,1980~2000年,多数单元 D_j 值都有所下降,只有无锡市区、常州市区、溧阳、金坛、江阴等少数单元与其他部分单元的土地利用结构差异性有所加强,这与上述土地利用变化主导类型及区域特征分析基本吻合。

3.2.2 土地利用有序性 信息熵 H_j (据式(2)计算,如图2)的计算结果表明,苏锡常地区土地利用有序性的区域差异性明显。按照 H_j 的平均值及其极值情况,可以分为3种类型:一类包括宜兴、金坛、无锡市区、溧阳和常熟($H_j \geq 1.4$),土地利用类型复杂。这些区域的水田面积比重相对较小,而其他用地类型比例较高;二类包括苏州市区、常州市区、张家港和吴江($1.2 \leq H_j < 1.4$)。本文分析单元与当前行政区划一致,值得注意的是,如果按照原行政区划,苏州和常州两市区 H_j 的三期监测数据平均值分别为1.3140和1.5803,均高于当前行政区划条件下的相应值(分别为1.3012和1.4610),可见行政区划调整对区域土地利用具有输入负熵流,促进土地利用系统趋于有序发展的作用;三类包括江阴、昆山和太仓($H_j < 1.2$),这些区域土地利用类型相对比较单一,主要为水田和水域,如:昆山、太仓、江阴的水田比重在研究区中列前三位。

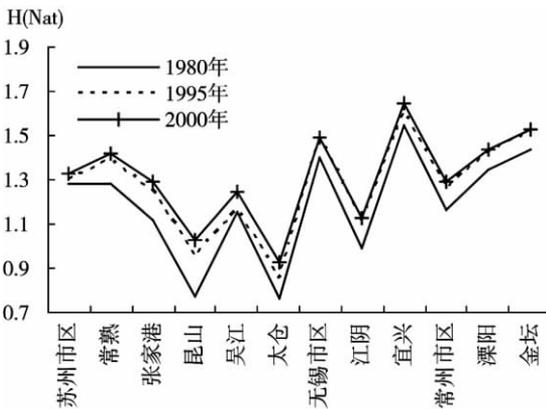


图2 苏锡常地区土地利用结构信息熵

Fig. 2 The information entropy of land use composition in the SXC region

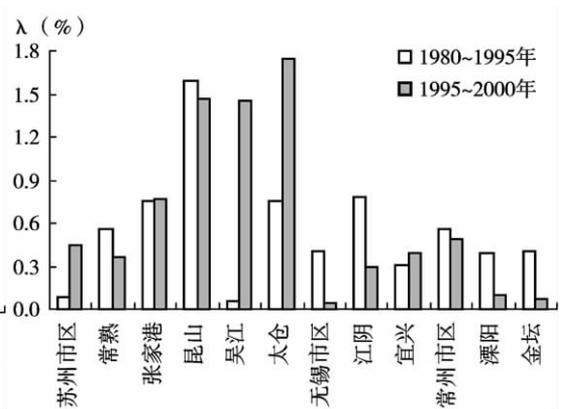


图3 土地利用结构信息熵年变化率

Fig. 3 The p. a. change rate of information entropy of land use composition in the SXC region

信息熵年均变化率 λ 表明(图 3), H_j 具有一定的动态差异性。1980~2000 年不同分析单元的 H_j 表现为不同程度的增加态势。前 15 年 λ 比较稳定, 仅昆山的 H_j 变化强烈, λ 值达 1.584%, 其他单元 λ 值在 0.1%~0.8% 之间; 后 5 年 λ 的区域差异性则更加明显, 而且 H_j 的基数越小, 其变化速度越快(λ 值越大), 即土地利用越趋向于无序。其中昆山、吴江和太仓三市位于上海、苏锡常都市圈和浙江环杭州湾地区交会处, 土地利用结构原本较为有序, 改革开放后依托优越的自然及区位条件, 经济社会发展取得了巨大成就, 同时城乡建设对耕地的大量占用, 致使土地利用结构有序度不断降低。

3.2.3 土地利用综合变化速率 土地利用类型综合转换速率系数 V 表明(图 4), 苏锡常地区两个时期土地利用综合变化速率的差异并不大, 但内部单元之间土地利用平均变化速率却存在较大的时空差异, 且差异性有扩大的趋势。进一步按照 V 的平均值与极值情况, 分 3 种类型进行具体分析, 即较慢变化($V \leq 0.007$)、中等变化($0.007 < V \leq 0.016$) 和较快变化($V > 0.016$)。1980~1995 年期间, 仅有吴江为“较慢变化型”, 占研究区总面积的 6.95%; 常州市区和张家港为“较快变化型”, 占研究区总面积 15.87%; 其他单元为“中等变化型”, 占 77.18%, 但这些单元之间也存在一定的差异, 如江阴、昆山和无锡市区的 V 值相对较高。1995~2000 年间, 土地利用类型转换的区域分异特征发生了较大变化, 金坛和溧阳的变化速度有所放缓, 由中等变化型变为较慢变化型, 合计占研究区总面积的 14.29%; 吴江、昆山和太仓的变化速度进一步加快, 分别由较慢变化型或中等变化型变为较快变化型, 占 16.87%; 其他单元均为中等变化型, 占 68.84%。此外, 从 V 值的具体增减情况分析, 大多数单元土地利用变化速度还具有“此消彼涨”的特征, 即前一时期的速度较快, 则后一时期的速度会有所减缓, 反之亦然。这可能与政策调控的时效性、城镇扩张的周期性和经济发展的阶段性有一定关联。

3.2.3 土地利用综合变化速率 土地利用类型综合转换速率系数 V 表明(图 4), 苏锡常地区两个时期土地利用综合变化速率的差异并不大, 但内部单元之间土地利用平均变化速率却存在较大的时空差异, 且差异性有扩大的趋势。进一步按照 V 的平均值与极值情况, 分 3 种类型进行具体分析, 即较慢变化($V \leq 0.007$)、中等变化($0.007 < V \leq 0.016$) 和较快变化($V > 0.016$)。1980~1995 年期间, 仅有吴江为“较慢变化型”, 占研究区总面积的 6.95%; 常州市区和张家港为“较快变化型”, 占研究区总面积 15.87%; 其他单元为“中等变化型”, 占 77.18%, 但这些单元之间也存在一定的差异, 如江阴、昆山和无锡市区的 V 值相对较高。1995~2000 年间, 土地利用类型转换的区域分异特征发生了较大变化, 金坛和溧阳的变化速度有所放缓, 由中等变化型变为较慢变化型, 合计占研究区总面积的 14.29%; 吴江、昆山和太仓的变化速度进一步加快, 分别由较慢变化型或中等变化型变为较快变化型, 占 16.87%; 其他单元均为中等变化型, 占 68.84%。此外, 从 V 值的具体增减情况分析, 大多数单元土地利用变化速度还具有“此消彼涨”的特征, 即前一时期的速度较快, 则后一时期的速度会有所减缓, 反之亦然。这可能与政策调控的时效性、城镇扩张的周期性和经济发展的阶段性有一定关联。

4 苏锡常地区土地利用变化时空分异的生态环境响应分析

4.1 生态环境状况评价分析

苏锡常地区生态环境状况评价结果表明(表 3), 各单元生态环境状况的区域分异特征明显, 且分异程度呈现扩大趋势, 3 个时相 EI 的标准差分别为 5.38、5.89 和 5.91。宜兴和溧阳土地利用类型全面, 生物多样性丰富, 林、草地比重大, 城镇及工矿用地比重小, 植被覆盖度高; 昆山的林地质量好, 多数为有林地, 水田面积大, 无农地侵蚀现象, 按照《规范》的分级标准, 这 3 个单元的生态环境状况为“优”($EI \geq 75$)。虽然其他单元的生态环境状况均为“良”($55 \leq EI < 75$), 但相互之间的差异性仍比较明显。比如江阴和苏州市区, 前者水域面积小, 未利用地面积较大, 建设用地比重较高, 单位面积污染物排放量大, 而后者水域面积占了绝对比重, 建设用地比重也低于前者, 使得两者的 EI 值相差较大。可见区域生态环境状况在很大程度上受土地利用方式与结构的影响。

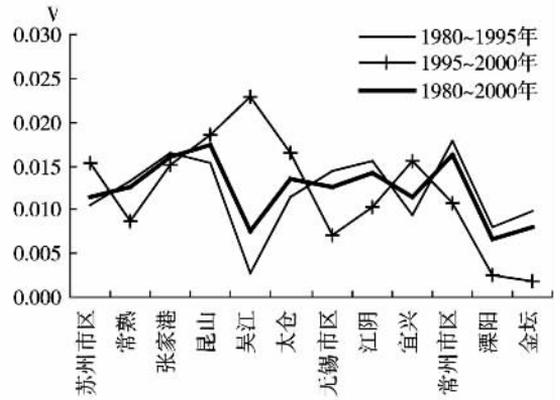


图 4 苏锡常地区土地利用类型综合转换速度系数
Fig. 4 Comprehensive coefficient of land use type change velocity in the SXC region

对比不同时期 EI 值并计算其年均变化率 (图 5), 可发现多数单元生态环境状况呈逐渐变差的趋势, 3 期 EI 均值分别为 71.16、70.66 和 70.29。1980~1995 年, 由于林地、水域等地类的增加, 使得吴江、溧阳和宜兴的生态环境状况有所改善, 而其他单元生态环境状况都有所变差, 其中江阴、张家港、常州市区和无锡市区的变化最为明显。这 4 个区域的土地利用类型转换迅速, 且都是土地利用主导变化类型的重点分布区 (表 1)。1995~2000 年, 只有溧阳和金坛的生态环境状况有所改善, 原因是这两个单元的 V 值最小, EI 值基数较大, 且期间的高覆盖草地和水域均有所增加。其他多数单元的生态环境状况表现为加速变差的态势, 吴江、昆山、张家港、江阴、宜兴以及苏州和常州市区的变化最为明显。这些区域的工业化和城市化进程快, 建设用地扩张迅速, 耕地资源流失现象严重, 多数为土地利用主导变化类型的重点分布区, 土地利用有序性程度不断降低。

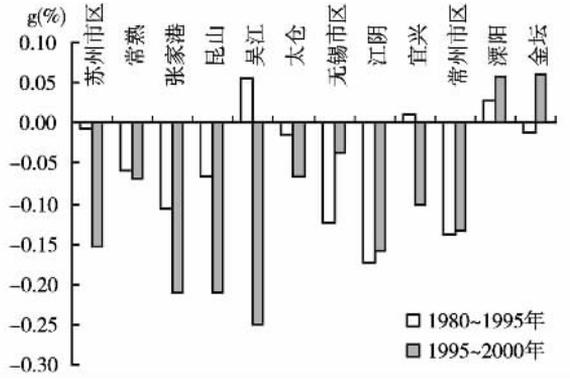


图 5 苏锡常地区生态环境状况指数年均变化率

Fig.5 The p. a. change rate of EI in the SXC region

4.2 土地利用变化生态环境响应定量分析

4.2.1 ERH 指数分析

ERH 指数表明 (表 3), 区域生态环境状况对土地利用有序性变化的响应具有明显的时空分异特征。1980~1995 年, ERH 指数的绝对值均值为 0.25, 方差为 0.32。其中只有吴江、宜兴和溧阳的 ERH 值为正, 这些单元的土地利用有序性都有所降低, 但同时也伴随着生物丰度和植被覆盖条件的进一步改善, 土地利用有序性变化对生态环境具有正向影响。此外, 土地利用有序性变化方式和动因的差异性, 导致相应的生态环境响应程

表 3 1980~2000 年苏锡常地区不同时期 EI、ERH 和 ERV 值

Tab.3 The EI, ERH and ERV of different periods in SXC region

	EI			ERH		ERV	
	1980 年	1995 年	2000 年	1980~1995 年	1995~2000 年	1980~1995 年	1995~2000 年
苏州市区	70.80	70.72	70.18	-0.08	-0.34	-0.66	-9.98
常熟	65.35	64.77	64.55	-0.11	-0.19	-4.46	-7.92
张家港	67.56	66.47	65.78	-0.14	-0.27	-6.54	-13.89
昆山	77.94	77.16	76.35	-0.04	-0.14	-4.31	-11.36
吴江	74.38	74.99	74.07	0.93	-0.17	20.99	-10.93
太仓	70.28	70.14	69.91	-0.02	-0.04	-1.20	-4.04
无锡市区	68.24	66.99	66.87	-0.30	-0.76	-8.53	-5.05
江阴	62.19	60.57	60.09	-0.22	-0.53	-11.14	-15.40
宜兴	79.29	79.42	79.02	0.04	-0.26	1.24	-6.48
常州市区	68.83	67.40	66.95	-0.25	-0.27	-7.79	-12.36
溧阳	78.48	78.79	79.02	0.07	0.57	3.37	24.09
金坛	70.56	70.44	70.66	-0.03	0.92	-1.10	33.77
均值	71.16	70.66	70.29	0.25	0.58	9.15	19.10
标准差	5.38	5.89	5.91	0.32	0.45	8.32	15.57

度有所不同。比较理想的响应现象是, 以最小的有序性变化带来最大的生态环境正向响应, 例如: 吴江的 λ 值较小, 而相应的 EI 值却增加了 0.61 (最高); 反之, 如果土地利用有序性变化的生态环境响应为负向, 则这种响应程度越小越好, 例如: 昆山、常州和无

锡市区, 三者的 λ 值都比较大, 但后两者引起的负向响应远大于昆山。1995~2000 年, ERH 指数的绝对值均值为 0.58, 方差为 0.45, 都大于前 15 年的相应值, 可见土地利用有序性变化的生态环境响应程度进一步增加, 而且区域差异性更为明显。ERH 值变化幅度较大的包括苏州市区、昆山、吴江、无锡市区、江阴、宜兴等地, 主要是因为这些区域的建设用地扩张迅速, 耕地大量减少, 林草地比重下降, 生物丰度和植被覆盖度加速退化。

4.2.2 ERV 指数分析 由表 3 看出, ERV 指数值具有与 ERH 指数相似的特征。这种相似性首先表现在响应程度的变化上, 1980~1995 年, ERV 指数的绝对值均值为 9.15, 方差为 8.32, 而到了 1995~2000 年分别增加到了 19.10 和 15.57, 即相应的生态环境响应程度和区域分异性进一步加强。响应程度变化最为明显的是吴江、金坛、溧阳、苏州市区等地, 对照表 3 中的结果, 表明吴江和苏州市区后 5 年的土地利用变化是以严重影响区域生态环境为代价的, 而金坛、溧阳的情况与之恰恰相反; 其次, 还表现在生态环境响应方向和程度的时空分异上, 即各单元 ERH 和 ERV 指数的符号相同, 而且若某单元的 ERH 值较大, 则其 ERV 值也相应较大。土地利用类型综合转换与土地利用有序性的变化具有内在联系, 一般 V 值越大, λ 值也越大, 但 H_j 却会出现或大或小两种可能性。上述分析结果表明, 研究区各单元土地利用变化都不同程度的降低了土地利用有序性, 在土地利用系统趋于复杂无序的同时, 大多数单元的生态环境状况都表现为逐渐变差的响应特征。

5 结论与讨论

(1) 上世纪末的 20 年时间里, 苏锡常地区土地利用变化的主导类型是建设用地大量扩张和耕地资源急剧减少, 而且土地利用变化类型也趋于多样化, 土地利用类型间的转化呈现分散与集中相结合的特征。

(2) 各单元间土地利用表现为一定程度的区域分异特征。在人类活动对土地的扰动作用日益加强和区域经济社会发展目标趋同性的双重影响下, 土地利用的区域差异性呈现逐渐缩小的趋势。不断产生的土地利用结构信息熵流, 使得各单元土地利用系统都不同程度地趋向于复杂无序。土地利用类型综合转换速率比较稳定, 但区域分异特征明显, 而且分异性程度具有进一步扩大的趋势。

(3) 土地利用/覆盖格局的差异性在很大程度上决定了研究区生态环境状况的分异规律, 而且土地利用差异性与生态环境状况差异性表现为逆向变化特征。同时由于生物丰度和植被覆盖度等因素的变化, 使得大多数单元生态环境状况都表现为不同程度的恶化。这种现象在区位条件更为优越、经济更加发达的土地利用变化重点区域表现得尤其明显。

(4) 生态环境状况对土地利用有序性和综合变化速率表现出类似的响应特征。不同单元的生态环境状况对土地利用有序性和土地利用综合变化速率的响应程度和方向都存在较大差异, 多数区域土地利用变化都引起了系统有序度的降低, 并导致区域生态环境状况不断变差。那些本底生态环境状况优良、土地利用有序度较高的单元, 其生态环境对土地利用变化一般都表现为正向响应; 而那些本底生态环境状况相对较差的区域, 往往因为城乡建设用地迅速扩张和耕地资源的大量流失而表现为负向响应, 且响应程度不断加强。

基于以上分析, 认为在经济快速发展和快速城市化进程中, 应该充分认识区域资源环境状况及其变化趋势。对于土地利用有序度低, 且生态环境状况差的区域, 应该适当控制土地利用变化速度, 并通过合理规划和产业政策调整等措施, 引导土地利用向有利于增加

生物丰度、植被覆盖度和减少环境污染的方向发展,使土地利用趋于有序;而那些土地利用有序度高,且生态环境状况好的区域,往往经济发展相对落后,此时可以通过优化土地利用结构,增加交通、水利等基础设施投入,在尽可能保护生态环境的前提下,转变低效用地的利用方式,提高土地利用的综合效益。

参考文献:

- [1] Barney Cohen. Urban growth in developing countries: A review of current trends and a caution regarding existing forecasts. *World Development*, 2004, 32(1):23~51.
- [2] 刘盛和,何书金.土地利用动态变化的空间分析测算模型. *自然资源学报*, 2002, 17(5):533~540.
- [3] Martin Herold, Helen Couclelis, Keith Clarke. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2005, 29(4):369~399.
- [4] 田光进,刘纪远,庄大方,等.基于遥感和GIS的20世纪90年代中国城镇用地时空特征. *第四纪研究*, 2003, 23(4):421~427.
- [5] Weber C Puissant A Urbanization pressure and modeling of urban growth: Example of the Tunis metropolitan area. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3):341~352.
- [6] 宗跃光,王蓉,汪成刚,等.城市建设用地生态适宜性评价的潜力—限制性分析——以大连城市化区为例. *地理研究*, 2007, 26(6):1117~1127.
- [7] 刘彦随,彭留英,陈玉福.东北地区土地利用转换及其生态效应分析. *农业工程学报*, 2005, 21(11):175~178.
- [8] 莫宏伟,任志远,谢红霞.农牧交错区土地利用动态与生态效应变化——以榆阳区为例. *干旱区地理*, 2005, 28(3):352~356.
- [9] 吕昌河,贾克敬,冉圣宏,等.土地利用规划环境影响评价指标与案例. *地理研究*, 2007, 26(2):249~257.
- [10] 喻峰,李晓兵,王宏,等.皇甫川流域土地利用变化与生态安全评价. *地理学报*, 2006, 61(6):645~653.
- [11] 蒋勇军,袁道先,章程,等.典型岩溶农业区土地利用变化对土壤性质的影响——以云南小江流域为例. *地理学报*, 2005, 60(5):751~760.
- [12] 吕晓芳,王仰麟,张锦锂,等.宁夏中部生态脆弱区土地利用变化及沙漠化响应——以宁夏盐池县为例. *地理研究*, 2007, 26(6):1157~1166.
- [13] 李晓兵,陈云浩,王宏,等.中国土地覆盖动态变化幅度的区域分异规律. *地理科学*, 2004, 24(3):271~275.
- [14] 万荣荣,杨桂山.太湖流域土地利用变化及其空间分异特征研究. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(3):298~303.
- [15] 索安宁,巨天珍,熊友才,等.泾河流域土地利用区域分异与驱动力的关系. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6):75~80.
- [16] 王静爱,徐霞,刘培芳.中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究. *资源科学*, 1999, 21(5):19~25.
- [17] 郑袁明,罗金发,陈同斌,等.北京市不同土地利用类型的土壤镉含量特征. *地理研究*, 2005, 24(4):542~548.
- [18] 史培军,刘宝元,张科利,等.土壤侵蚀过程与模型研究. *资源科学*, 1999, 21(5):9~18.
- [19] 龚建周,夏北成.1990年以来广州市土地覆被景观时空梯度分异. *地理学报*, 2007, 62(2):181~190.
- [20] 白艳莹,王效科,欧阳志云,等.苏锡常地区生态足迹分析. *资源科学*, 2003, 25(6):31~37.
- [21] 周峰,濮励杰,彭补拙.苏锡常地区土地利用变化及其绩效分析. *自然资源学报*, 2006, 21(3):392~400.
- [22] 谭永忠,吴次芳.区域土地利用结构的信息熵分异规律研究. *自然资源学报*, 2003, 18(1):112~117.
- [23] 陈彦光,刘继生.城市土地利用结构和形态的定量描述:从信息熵到分数维. *地理研究*, 2001, 20(2):146~152.
- [24] 傅伯杰,陈利顶,马克明.黄土丘陵区小流域土地利用变化对生态环境的影响——以延安市羊圈沟流域为例. *地理学报*, 1999, 54(3):241~246.
- [25] 虞孝感,陈雯.城市更新与区域经济发展——以苏锡常为例. *城市问题*, 1995, 1:25~30.

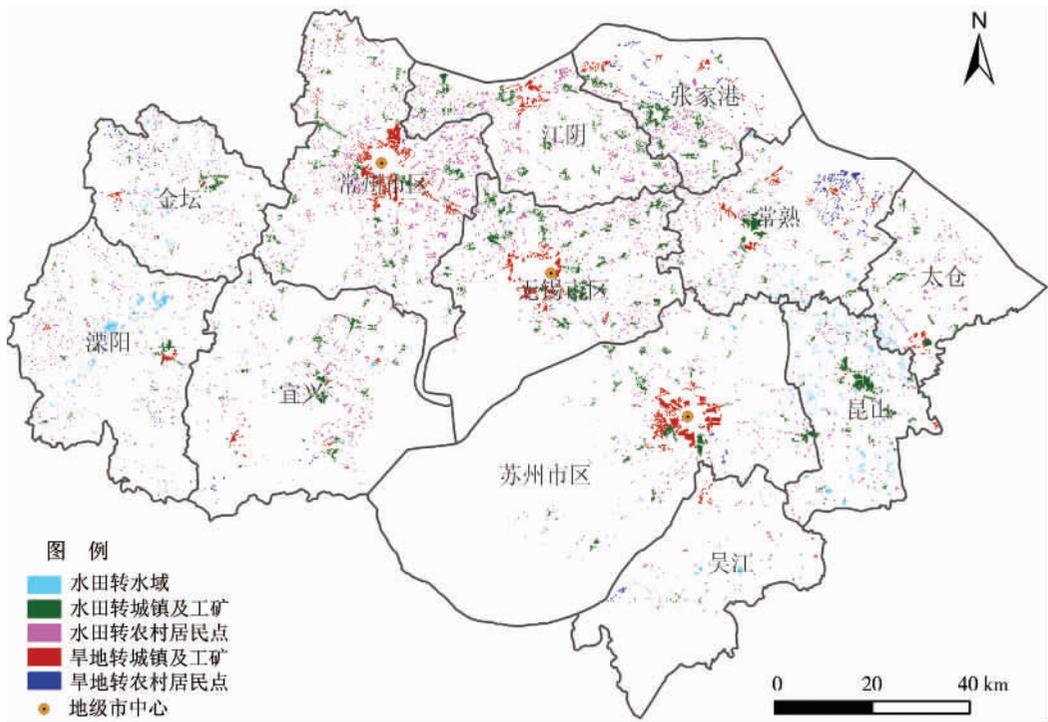
Spatio-temporal pattern of land use change and its eco-environmental response in Suzhou-Wuxi-Changzhou Region

TU Xiao-song, PU Li-jie

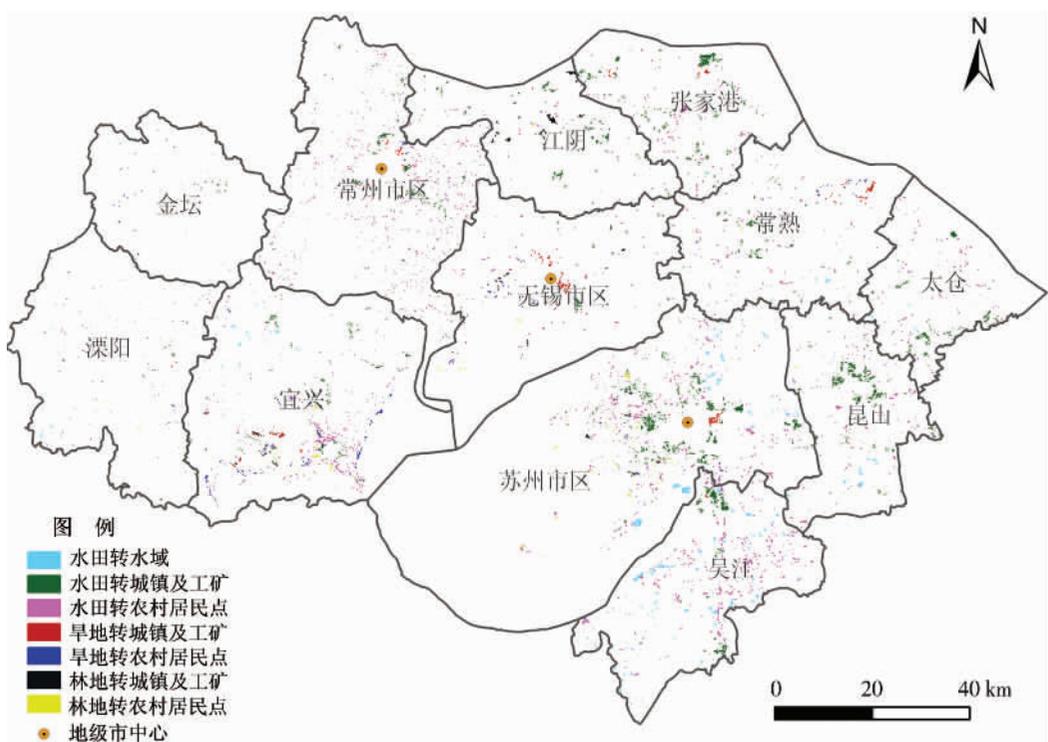
(School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Suzhou-Wuxi-Changzhou(S-X-C) region is one of the hottest spots for socio-economic development in China, the land use change and corresponding eco-environmental problems have intensified further. Taking 12 county-level cities and districts of the region as study units, the spatio-temporal distribution characteristics were revealed and eco-environmental situation was evaluated, based on Landsat TM data in 1980, 1995, 2000 and relevant statistical and investigation data on eco-environment. Further, this paper mainly analyzes the eco-environmental responses to spatio-temporal distribution of land use change. Results of the study show: (1) The dominant types of land use change from 1980 to 2000 are the land expansion for urban onstruction purpose and sharp decrease of cultivated land. The conversion of paddy fields to urban and rural construction land dispersed in every unit. However, the conversion of other different land types relatively concentrated in several main units. And the number of dominant types of land use change more from was greater 1995 to 2000 than that 15 yearsago. (2) As an index used to measure land use diversity, D_j showed that there were different land use structure in every unit, and the diversity degree between every two units was different but the difference showed a tendency of decreasing. The information entropy of land use structure was used to weigh land use system orderliness. On the one hand, it showed that land use system tended to be more and more disordered in the majority of units, on the other hand, the disordered degree becomes greder more obvious with the development of society and economy. In addition, the index V indicated the similar character of land use change rate with land use system orderliness. (3) Eco-environmental situation tended to deteriorate gradually in most units, especially in the recent five years (1995-2000). There were distinct and different eco-environmental responses to land use change and its spatio-temporal distribution. The phenomenon was more outstanding in the main units of land use change. (4) In different units, the eco-environmental status responded differently to the orderliness and comprehensive change rate of land use. Moreover, the response and its differentiation increased to different degrees with the change of land use. In general, the paper emphasizes the response of eco-environment to land use change and its spatio-temporal distribution characteristics. It puts forward suggestions concerning the adjustment of land use planning, industrial policy and the optimization of land use pattern and improvement of land use mode, on the basis of simulation and prediction of land use change and its possible eco-environmental response.

Key words: land use change; eco-environment; spatio-temporal distribution; Suzhou-Wuxi-Changzhou region



(a) 1980~1995 年



(b) 1995~2000 年

图 1 苏锡常地区土地利用变化主导类型(1980~2000)

Fig.1 The dominant types of land use change in the SXC region (1980~2000)