

# 苏南地区土地利用的生态敏感性分区

夏敏, 张智超, 文博, 邹伟

(南京农业大学 公共管理学院, 江苏 南京 210095)

**摘要:** [目的] 开展土地生态敏感性分区研究, 剖析区域不同土地利用方式下土地生态环境状况, 为区域土地利用规划等提供依据。[方法] 以苏南地区典型城市宜兴市作为研究区, 采用 USLE 与景观安全格局方法划分水土流失敏感区和生物多样性敏感区, 进而得到宜兴市土地利用的生态敏感区。[结果] 宜兴市土地利用生态敏感程度总体较低, 一般敏感区与低敏感区面积接近区域总面积 68.17%, 极敏感区分布集中, 敏感等级由南部山区向北部平原逐步降低。[结论] USLE 与景观安全格局相结合进行土地利用的生态敏感性分区研究, 可以发挥两者的长处, 综合和定量分析不同因素对区域生态环境的影响。

**关键词:** 土地利用; 生态敏感区; USLE; 景观安全格局; 宜兴市

**文献标识码:** B

**文章编号:** 1000-288X(2016)04-0112-06

**中图分类号:** F301.2

**文献参数:** 夏敏, 张智超, 文博, 等. 苏南地区土地利用的生态敏感性分区[J]. 水土保持通报, 2016, 36(4): 112-117. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.020

## Ecological Sensitive Zoning of Land Use in Southern Jiangsu Province

XIA Min, ZHANG Zhichao, WEN Bo, ZOU Wei

(College of Public Administration, Nanjing Agricultural University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

**Abstract:** [Objective] Land ecological sensitive zoning was comprehensively analyzed under different land use type to provide reference for regional land use planning. [Methods] Yixing City, a typical city in Southern Jiangsu Province was taken as an example, its land use ecological sensitive zones were divided according to the zones of soil and water loss sensitivity and biodiversity preservation priority using USLE model and landscape security pattern. [Results] The ecological sensitivity in Yixing City was thought relatively low. The zones with extremely high sensitivity accounted only for 7.87% of the total area, the zones with high sensitivity, moderate sensitivity and low sensitivity covered 23.96%, 35.71% and 32.46%, respectively. The zones with extremely high sensitivity were clustered together in space. Sensitivity declined gradually from the southern hill district to the northern plain district. [Conclusion] The application of USLE model combined with landscape security pattern can comprehensively recognize the factors that influence ecological sensitivity, and quantitatively grade the land use ecological sensitive zones.

**Keywords:** land use; ecological sensitive zones; USLE model; landscape security pattern; Yixing City

生态环境敏感性指生态系统对人类活动反应的敏感程度, 可以反映产生生态失衡与生态环境问题的可能性大小, 土地利用的生态敏感性主要针对人类土地利用的生态环境问题而言<sup>[1]</sup>。随着人类经济技术水平的提升, 对土地资源的利用方式和利用强度发生了巨大的变化, 可能会导致生态系统结构和功能紊乱、景观破坏、水土流失、滑坡、泥石流等自然灾害, 从而影响土地生态环境的安全与健康<sup>[2]</sup>。近年来, 土地

生态敏感性研究得到了国内外学者的广泛重视, 在土地生态敏感性评价指标体系及评价方法的选择<sup>[3]</sup>, 土地生态敏感分区与调控<sup>[4]</sup>, 土地生态敏感性时空动态变化<sup>[5]</sup>等方面都做了有益探索。土地生态敏感性分区研究是对区域不同土地利用方式下土地生态环境状况的深入剖析, 可以为区域功能区划、生态规划, 识别利用与保护范围, 开展生态环境建设、安排区域生态环境管控对策等提供依据。国内外学者通过选取

收稿日期: 2015-09-23

修回日期: 2016-04-29

资助项目: 中国科学院流域地理学重点实验室开放基金项目“城乡统筹背景下基于多智能体的农村土地利用变化模拟研究”(WSGS2015008); 江苏省国土资源厅科技项目(2015023); 中央高校基本科研业务费人文社科基金项目(SK2016024); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(14YJC760061); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYZZ15\_0161)

第一作者: 夏敏(1971—), 女(汉族), 江苏省南京市人, 博士, 副教授, 主要从事土地评价和土地信息系统研究。E-mail: xm@njau.edu.cn.

水土流失、地质灾害、地形坡度、土壤条件等指标构建土地生态敏感性评价指标体系,探讨区域土地生态敏感性,进而进行分区研究<sup>[6]</sup>;在研究方法方面,综合评价法、主成分分析法、灰色关联度法等经典方法在土地生态敏感性评价与分区研究中均得到了应用<sup>[7-8]</sup>。随着研究的深入,也有学者借助土壤流失方程(简称 USLE 方程)研究流域、县域、生态脆弱区等区域的土地生态敏感性<sup>[9]</sup>;景观生态学的理论与方法也被应用于土地生态敏感性研究中,以解决生态敏感区域识别、分区与管控,面源污染控制,以及生物多样性保护等方面的问题<sup>[10-11]</sup>。虽然 USLE 方程在水土流失测算方面具有优势,能够较好地对区域范围内水土流失方面的生态敏感性进行测度,但该方法缺乏对区域生物多样性的考量;而景观安全格局理论与方法以其在反映生物多样性保护等景观过程方面的优势,可以弥补这一缺陷,因此,将 USLE 方程与景观安全格局结合可以有效研究人地关系复杂、生态环境保护与经济发展矛盾突出的特定地带的土地生态敏感性问题<sup>[12]</sup>,然而目前的研究大多从两个方面分别展开,未能实现 USLE 方程与景观安全格局的紧密结合。

苏南地区处于长江中下游太湖流域,水系发达,植被覆盖度高,生物资源丰富,作为我国经济最为发达的地区之一,该区人口密度高、人地关系紧张,长期城市化建设导致土地开发利用范围广、强度大,土地利用结构与空间布局的变化易产生水土流失及生物多样性破坏等生态敏感问题,对人类生存环境与社会经济可持续发展产生潜在不良影响<sup>[13]</sup>。本研究以苏南地区典型城市宜兴市为例,采用 USLE 模型和景观安全格局方法分别划分水土流失敏感区和生物多样性敏感区,进而得到宜兴市土地利用的生态敏感区,分析各敏感区特点并提出针对性的土地利用建议,以期为宜兴市制定可持续土地利用规划,缓解土地开发利用与生态保护间的矛盾提供参考,同时为丰富土地生态敏感性研究方法体系做出一定的贡献。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

宜兴市地处北纬 31°07′—31°37′,东经 119°31′—120°03′,位于江苏省南部,江苏省西南端,东依太湖,南临长兴、广德,西接溧阳,北傍金坛、武进,全市总面积 1 996.6 km<sup>2</sup>。2010 年户籍总人口 107.24 万人,城市化率达 58.2%,经济发展水平位居全国前列。同时,宜兴市属于太湖流域,雨水充沛,辖区内河网密布,南部山地丘陵地区属天目山余脉,地形起伏较大,自然环境优美,物种多样性高。

### 1.2 数据来源

选用宜兴市 2010 年 ETM 遥感数据,空间分辨率为 30 m。通过对遥感数据进行解译和分类,划分了草地、耕地、建设用地、林地、园地、水域、未利用地共 6 种土地利用类型,分类结果的精度为 86.80%,其 Kappa 系数为 0.85,满足精度要求;达到允许的最低判别精度 0.7 的要求;土壤类型和有机质含量数据来源于中科院南京土壤研究所;坡度坡长因子通过比例尺为 1:10 万的 DEM 获得;降雨量数据则采用当地水利局提供的 16 个气象站点年均降雨量,采用 Kriging 插值得到其空间分布图。

## 2 研究方法

我国南方地区的土壤侵蚀大多属于水力侵蚀,USLE 模型是目前较为成熟的土壤水力侵蚀模拟模型,应用 USLE 模型计算土壤侵蚀量并划分宜兴市水土流失敏感区。景观安全格局理论基于景观过程和格局的关系,通过景观过程的分析 and 模拟,来判别对这些过程的健康与安全具有关键意义的景观格局,在生物保护方面有着一定的理论和实践意义,本文应用景观安全格局理论构建宜兴市生物多样性安全格局,据此划分生物多样性敏感区。在此基础上叠加得到宜兴市土地利用的生态敏感区。

### 2.1 USLE 模型

USLE 模型是美国学者通过对多年观测资料进行系统分析而得出的用于预测年均土壤流失量的经验模型,该模型考虑了影响水土流失的 6 个影响因素,在方程中 6 个因子用连乘形式表示,其表达式为<sup>[14]</sup>:

$$A=R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P \quad (1)$$

式中:A——单位面积年平均土壤流失量[t/(km<sup>2</sup>·a)];R——降雨侵蚀力因子[mJ·mm/(hm<sup>2</sup>·h·a)];K——土壤可蚀性因子[(t·hm<sup>2</sup>)/(mJ·mm)];L——坡长因子;S——坡度因子;C——植被覆盖因子;P——水土保持措施因子。

2.1.1 降雨侵蚀力因子 R R 因子与降雨量、降雨强度、历时、雨滴大小以及雨滴下落速度有关,反映了降雨对土壤的潜在侵蚀能力。周伏建<sup>[15]</sup>提出的降雨侵蚀力因子值计算方法适用于我国南方地区。鉴于此,本研究采用此公式进行地处我国南方地区的宜兴市的降雨侵蚀力因子计算:

$$R=\sum_{i=1}^{12}(-1.5527+0.1792P_i) \quad (2)$$

式中:P<sub>i</sub>——月降雨量(mm)。

2.1.2 土壤可蚀性因子 K K 因子反映降雨产生的径流量与径流速率的大小及土壤对侵蚀的敏感性。

根据南京土壤所提供的研究区土壤类型和有机质含量,参考吕喜玺等<sup>[16]</sup>提出的南方易蚀土壤可蚀性因子计算方法,计算宜兴市土壤可蚀性因子  $K$  值。

2.1.3 坡度与坡长因子  $SL$  坡度因子  $S$  与坡长因子  $L$  分别指在其他条件相同的情况下,任意坡度下单位面积土壤流失与标准坡度下单位面积土壤流失量之比以及任意坡长的单位面积土壤流失量与标准坡长单位面积土壤流失量之比。参考国内外相关研究<sup>[17]</sup>,采用国内外学者较为公认的坡度与坡长因子计算方法进行计算:

$$SL = \sqrt{0.045L(65.4\sin^2\theta + 4.56\sin\theta + 0.065)} \quad (3)$$

式中: $SL$ ——坡度坡长因子; $L$ ——坡长(m); $\theta$ ——坡度(°)。

2.1.4 植被覆盖与管理因子  $C$   $C$  因子指在相同的土壤、地形和降雨条件下,某一植被覆盖土地的土壤流失总量与相等条件下无管理措施的休闲地土壤流失总量的比值,反映了植被对地表的保护作用。 $C$  值介于 0.001~1 之间,在地表完全没有植被保护的情况下, $C$  值定为 1;地面完全被植被覆盖,则  $C$  值取为 0。本文  $C$  因子通过遥感解译的植被覆盖度和土地利用类型相结合得到<sup>[18]</sup>。

2.1.5 水土保持因子  $P$   $P$  因子指采用水土保持措施后的土壤流失量与自然植被或顺坡种植时土壤流失量的比值,介于 0~1 之间。0 值表示无侵蚀的地区,1 值表示未采取保持措施的地区。参考已有研究成果,结合宜兴市的地理环境、地貌类型等自然条件,考虑研究区域的相似性,借鉴黄金良<sup>[19]</sup>在九江流域的研究经验,确定研究区不同土地利用类型所对应  $P$  值。

## 2.2 生物多样性安全格局建立

景观安全格局理论认为,景观中的各点对某种生态的重要性存在差异,其中部分局部、点和空间关系对控制景观水平生态过程起着关键性的作用<sup>[20]</sup>。本研究采用最小累积模型来构建景观安全格局,其基本公式为:

$$MCR = f \min_{j=n}^{i=m} (D_{ij} \times R_i) \quad (4)$$

式中: $f$ ——一个未知的正函数,反映空间中任一点的最小阻力与其到所有源的距离和景观基面特征的相关关系; $D_{ij}$ ——某一质点从源  $j$  到空间某一点所穿越的某景观的基面  $i$  的空间距离(m); $R_i$ ——景观  $i$  对该质点运动的阻力系数。虽然通常函数  $f$  是未知的,但  $(D_{ij} \times R_i)$  的累加值可以视为源到空间某一点的某一路径的相对易达性衡量指标,其中从所有源到该点阻力的最小值被用来衡量该点的易达性。

2.2.1 源的确定 经过对宜兴市的实地调查发现,

宜兴市的动植物大都集中在南部丘陵山区,具体集中地包括铜官山、桃花山、龙池山、鸡笼山、蜀山、青龙山等丘陵山区,同时,溇湖、横山水库以及靠近城市的龙背山国家森林公园和城市内洄滨公园等处植被覆盖度较高、丰富度大,是众多生物的聚集地。故选择这些地区作为宜兴市生物多样性保护源。

2.2.2 阻力面的建立 人类活动对野生动物的生存和迁徙有着直接地影响,进而影响生物多样性水平,同时植被覆盖度越高,越适合动物活动,生物多样性水平就越高,因此本文选择植被覆盖度和土地利用类型两个因子建立阻力面。宜兴市不同植被覆盖度和土地利用类型的阻力系数赋值详见表 1。考虑到建设用地包括城市绿地、绿道等具有一定生态服务价值要素,且宜兴市城市绿化率较高,因此建设用地阻力系数低于未利用地。根据专家意见及前人研究成果,土地利用类型和植被覆盖度对生物多样性保护影响的重要性一致,对这两个阻力面分别赋以 0.5 的权重进行栅格计算,得到生物多样性阻力面。

表 1 生物多样性安全格局影响因素及其阻力系数

影响因素	分级	阻力系数	影响因素	分级	阻力系数
植被覆盖度	>0.528	1	土地利用类型	林地	1
	>0.455~0.528	2		水域	2
	>0.391~0.455	3		园地	3
	>0.329~0.391	4		耕地	4
	>0.275~0.329	5		草地	5
	>0.217~0.275	6		建设用地	7
	>0.140~0.217	7		未利用地	9
	>0.051~0.140	8			
	≤0.051	9			

2.2.3 生物多样性安全格局的建立 根据源和相应的阻力面,运用 ArcGIS 9.3 的费用距离模型分别计算不同保护目标下的最小累积阻力面,得到生物多样性安全格局。

## 2.3 水土流失与生物多样性敏感区划分

依据水利部 2008 年 1 月颁布的《土壤侵蚀分类分级标准 SL190-2007》和宜兴市土壤流失量核算结果划分宜兴市水土流失敏感区;依据生物多样性安全格局的最小累积阻力值,采用自然断点法得到生物多样性敏感区。分级标准详见表 2。

## 2.4 生态敏感区划分

依据表 2 对水土流失敏感区和生物多样性敏感区各级别赋值后分别赋以 0.5 的权重进行空间叠加分析,采用自然断点法划分低敏感、一般敏感、高敏感和极敏感 4 个敏感级别,得到宜兴市土地利用的生态敏感区。需说明的是,水土流失敏感区和生物多样性

敏感区的划分都涉及土地利用类型以及植被覆盖度, 但这两个基础因子在水土保持和生物多样性保护中

所起作用不同, 土地利用的生态敏感区是对这些作用的综合, 而非基础因子的单纯叠加。

表 2 水土流失及生物多样性敏感区分级与赋值

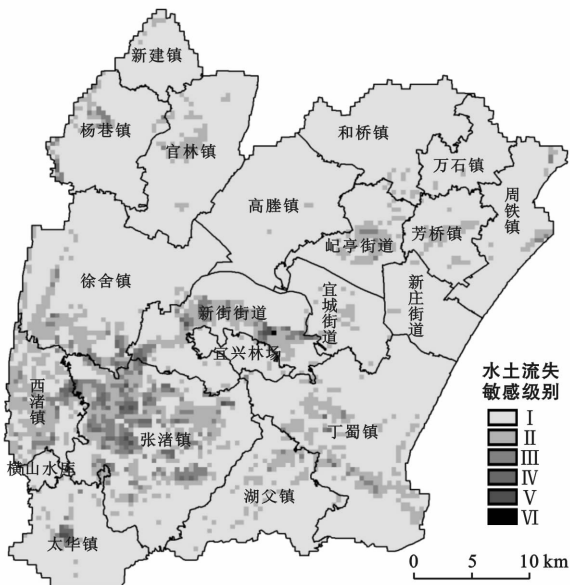
级别	微度	轻度	中度	强度	极强度	剧烈
平均侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	<500	500—2 500	2 500~5 000	5 000~8 000	8 000~15 000	>15 000
最小累积阻力值	<8 316	8 316—15 523	15 523—23 687	23 687—32 535	32 535—42 831	>42 831
赋值	1	2	3	4	5	6

注: 本文研究区在水力侵蚀类型区中属于南方红壤丘陵区, 容许土壤流失量 500 t/(km<sup>2</sup>·a)。

### 3 结果与分析

#### 3.1 单因子敏感区

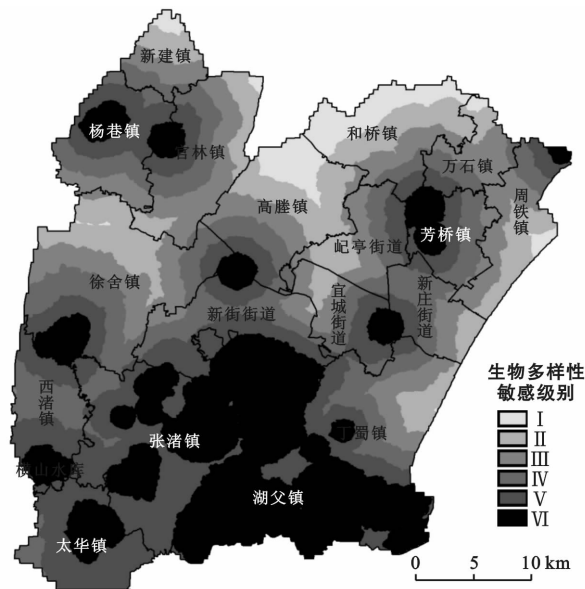
3.1.1 水土流失敏感区 宜兴市水土流失敏感性等级总体较低且分布较广, 微度敏感区面积占总面积 83.23%、轻度敏感区占 12.79%、中度敏感区为 3.08%, 主要分布于宜兴北部、东部和东南部, 包括新庄街道、配亭街道、万石镇、周铁镇、新建镇和芳桥镇等, 水土流失敏感区分级结果如图 1 所示。新庄街道、配亭街道等地植被覆盖度较低、水系发达, 但地势平坦、土地开发程度和土地集约利用程度高, 城市基础设施完善, 水土流失敏感等级较低; 而东南部的湖父镇、丁蜀镇等地, 则地处山区丘陵地带, 地势起伏较大, 但区域内植被覆盖度高、林地面积比重大, 且森林生态系统结构、功能得到了较好的保护, 因此这些区域抗侵蚀能力较强。水土流失敏感性强、极强与剧烈敏感区仅占研究区面积的 0.90%, 主要分布于宜兴中部、西部和西南部, 这些区域地势较低、植被覆盖度明显低于周边, 且水体、荒草地等生态脆弱斑块的外沿尚缺乏完善的生态基础设施作为缓冲区, 易发生水土流失。



注: I 微度; II 轻度; III 中度; IV 强度; V 极强度; VI 剧烈

图 1 宜兴市水土流失敏感区

3.1.2 生物多样性敏感区 宜兴市生物多样性敏感程度较高, 其中微度敏感区、轻度敏感区、中度敏感区、强敏感区、极强敏感区以及剧烈敏感区分别占研究区总面积的 3.99%、12.58%、16.55%、18.63%、23.48% 和 24.77%, 6 种敏感强度区呈现由强至弱的圈层镶嵌结构, 生物多样性敏感区分级结果如图 2 所示。



注: I 微度; II 轻度; III 中度; IV 强度; V 极强度; VI 剧烈

图 2 宜兴市生物多样性敏感区

剧烈敏感区集中在南部龙池山、铜官山、鸡笼山等地, 该区域植被覆盖程度高、植物以灌木林为主、生态环境优越、森林生态系统完整、生物资源量丰富; 极强敏感区主要分布于剧烈敏感区的外部圈层, 集中在张渚镇、太华镇、新街街道等地, 土地利用覆被以园地、有林地、河流水面等类型为主; 强敏感区主要分布于研究区中部以及北部的各个镇、街道, 该区域内旱地、水田、坑塘水面分布广泛, 属于受人为干扰较为明显的半人工生态系统; 中度敏感区主要集中于徐舍镇中部、高塍镇南部、官林镇中部、和桥镇等地的强敏感区外部, 土地利用覆被以农村建设用地、耕地为主, 生物多样性程度较低; 轻度敏感区、微度敏感区集中在研究区北部溇湖边缘区域, 以及太湖边缘地带, 主要分布于和桥镇、高塍镇的北部, 新建镇、官林镇以及周

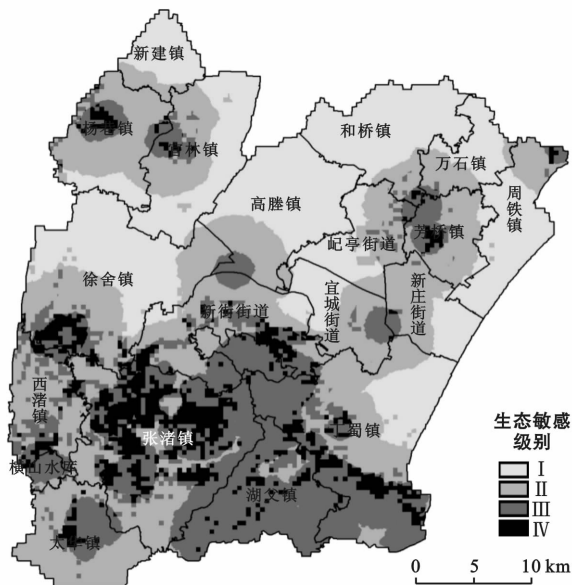
铁镇也有少量分布,该两类敏感区以养殖水面、农田水利用地、耕地以及农村建设用地为主,由于非农建设用地所占的比例不同,造成了生物多样性程度的差异,从而生物多样性敏感程度分异。

### 3.2 土地利用生态敏感区

总体来说,宜兴市土地利用的生态敏感性较低,低敏感区、一般敏感区分别占宜兴市总面积的 32.46% 和 35.71%;高敏感区占总面积 23.96%;极敏感区占 7.87%。在空间上呈现南高北低、丘陵山区高于平原地区的状态,宜兴市土地利用的生态敏感性分区结果如图 3 所示。由图 3 可以看出:(1)极敏感区占宜兴市总面积的 7.87%,主要分布于张渚镇中部、丁蜀镇中南部、徐舍镇南部、宜兴国家森林公园东部以及西渚镇横山水库北部。该区集中于城镇与农村交错地带,土地开发强度较大、人口密度大但城市基础设施尚不完善,地表具有一定程度起伏,农用地类型以耕地、园地为,植被覆盖度较低,土壤受侵蚀风险较大。基于该区域的特征,完善该区域内的城市基础设施,提高土地集约利用水平,对地质灾害易发区、生态环境控制关键土地斑块开展生态维护或通过土地利用工程技术进行修复,逐步降低土地利用生态风险。

(2)高敏感区占宜兴市总面积的 23.96%,主要分布于张渚镇东部、丁蜀镇西部、湖父镇、新街街道南部宜兴国家森林公园等地。该区普遍自然景观较为优越,地处南部山区的铜官山、桃花山、龙池山、鸡笼山、蜀山、青龙山等风景区,横山水库以及靠近城市的宜兴市国家森林公园和城市内的浣滨公园等地皆包括在内。由于植被覆盖度高、生物多样性丰富以及存在一定的水土流失风险,应根据宜兴市生态文明建设规划(2010—2020年)、宜兴市“十二五”环境保护和生态建设规划以及各风景区规划等内容,对该区域内的自然景观与人文景观开展有针对性的保护。(3)一般敏感区占宜兴市总面积的 35.71%,主要分布于丁蜀镇中北部、徐舍镇的东部和中部、新街街道北部、张渚镇南部、太华镇北部、西部与南部等地,基本处于农村地区。该区土壤肥沃、地势较为平坦,土地利用斑块类型以相互镶嵌的农用地和农村居民点用地为主,是宜兴市的主要农业生产区域。通过合理引导土地利用规划,适度开展农用地整治以及农村居民点整治等措施,优化该区域的土地利用结构与空间布局,逐步改善农村生态环境。(4)低敏感区占宜兴市总面积的 32.46%,主要分布于徐舍镇北部、高腾镇北部、和桥镇大部分区域、官林镇东部等地。该区域地势平坦,植被覆盖度较高,水土资源丰富,长期以来形成了稳定的地表水循环系统,抵御水土流失能力较强,土地

利用方式和土地利用强度亦较为稳定,建议在不破坏现有稳定状态的前提下,完善基础设施建设、适度布局建设用地,引导宜兴市城乡建设均衡发展。



注: I 低敏感; II 一般敏感; III 高敏感; IV 极敏感

图 3 宜兴市土地利用生态敏感区

## 4 讨论与结论

(1)宜兴市土地利用的生态敏感区可分为极敏感区、高敏感区、一般敏感区与低敏感区四类;土地利用生态敏感程度总体较低,敏感等级由南部山区向北部平原逐步降低,极敏感区与高敏感区向外辐射扩散形成低敏感级别区域。

(2)土地利用生态敏感区的级别受自然条件、土地利用方式与结构以及人类活动的共同影响,因此不同级别区域的土地利用对策各有不同,应当因地制宜地开展管制、保护、工程技术以及完善生态基础设施建设等措施以降低土地利用生态风险,实现宜兴市土地生态可持续发展。

(3)本研究采用 USLE 模型与景观生态学方法进行土地利用的生态敏感区划分,成果与实地调查结果较为一致,可为研究区土地利用政策、环境保护决策的制定提供参考,对提高研究区土地资源集约利用水平有积极意义,对于解决快速城镇化背景下日益突出的生态安全问题具有重要参考价值。虽然如此,本研究仅从水土流失和生物多样性两方面探讨了宜兴市土地利用的生态敏感区划分,研究有待进一步深入。

### 【参考文献】

[1] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒,基于 ArcGIS 区统计的延安市

- 土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1180-1188.
- [2] 史培军, 江源, 王静爱. 土地利用覆被变化与生态安全响应机制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 沈清基, 徐溯源, 刘立耘, 等. 城市生态敏感区评价的新探索: 以常州市宋剑湖地区为例[J]. 城市规划学刊, 2011(1): 58-66.
- [4] 吴克宁, 韩春建, 冯新伟, 等. 基于 3S 技术的土地生态敏感性分区研究[J]. 土壤, 2008, 40(2): 293-298.
- [5] 史小惠. 榆林地区土地生态敏感性时空动态分析[D]. 陕西 西安: 长安大学, 2013.
- [6] 李军, 曹明明, 邱海军, 等. 基于 GIS 的西安市土地生态环境敏感性评价研究[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2014, 44(1): 121-126.
- [7] 杨月圆, 王金亮, 杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [8] 帅红, 李景保. 南方小型矿业城镇土地生态敏感性评价: 以湖南省桂阳县为例[J]. 热带地理, 2010, 30(3): 323-236.
- [9] 颜磊, 许学工, 谢正磊, 等. 北京市域生态敏感性综合评价[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 3117-3125.
- [10] 吴剑, 陈鹏, 文超祥, 等. 基于探索性空间数据分析的海坛岛土地利用生态风险评价[J]. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2056-2062.
- [11] 潘影, 刘慧慧, 王静, 等. 基于 CLUE-S 模型的密云县面源污染控制景观安全格局分析[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 0529-0537.
- [12] 姚好, 张沛, 严力蛟, 等. 基于 RUSLE 和景观安全格局的土壤侵蚀风险格局研究: 以甘肃省甘南藏族自治州迭部县为例[J]. 水土保持通报, 2011, 31(3): 161-167.
- [13] 许妍, 高俊峰, 赵家虎. 基于 GIS 的太湖流域主要生态风险源危险度综合评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(3): 335-343.
- [14] A. Ugur Ozcan, Gunay Erpul, Mustafa Basaran, et al. Use of USLE/GIS technology integrated with geostatistics to assess soil erosion risk in different land uses of Indagi Mountain Pass-Cankiri, Turkey [J]. Environmental Geology, 2008, 53(8): 1731-1741.
- [15] 周伏建, 陈明华, 林福兴, 等. 福建省降雨侵蚀力指标的初步探讨[J]. 亚热带水土保持, 1989(2): 58-60.
- [16] 吕喜玺, 沈荣明. 土壤可蚀性因子  $K$  值的初步研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(1): 63-70.
- [17] Hickey R S A, Jankowski P. Slope length calculations from a DEM within ARC/INFO GRID. Computers [J]. Environment and Urban Systems, 1994, 18(5): 365-380.
- [18] 张岩, 袁建平, 刘宝元. 土壤侵蚀预报模型中的植被覆盖与管理因子研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 1033-1036.
- [19] 黄金良, 洪华生, 张璐平, 等. 基于 GIS 和 USLE 的九龙江流域土壤侵蚀量预测研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(5): 75-79.
- [20] 文博, 刘友兆, 夏敏. 基于景观安全格局的农村居民点用地布局优化[J]. 农业工程学报, 2014, 30(8): 181-191.

(上接第 111 页)

- [2] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性[J]. 中国环境科学, 2006, 26(3): 342-345.
- [3] 靳正忠, 雷加强, 徐新文, 等. 沙漠腹地咸水滴灌林地土壤养分、微生物量和酶活性的典型相关关系[J]. 土壤学报, 2008, 45(6): 1119-1127.
- [4] Schroth G, Sinclair F L. Trees, Crops and Soil Fertility [M]. Oxford: Oxford University Press, 2003.
- [5] Krishnan P, Alexander J D, Butler B J, et al. Reflectance technique for predicting soil organic matter [J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(6): 1282-1285.
- [6] 陈海波, 舒安平, 李芮. 山东省济莱市高速公路生态护坡植被恢复过程分析[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 93-99.
- [7] 赵娟, 许文年, 夏栋, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤酶与肥力的相关性研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16043-16045.
- [8] 吴彬, 夏振尧, 杨悦舒, 等. 向家坝工程扰动区不同类型边坡土壤不同形态磷的分布[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(6): 1262-1267.
- [9] 李绍才, 孙海龙, 杨志荣, 等. 岩石边坡基质—植被系统的养分循环[J]. 北京林业大学学报, 2006, 28(2): 85-90.
- [10] 章梦涛, 邱金淡, 颜冬. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(3): 10-12.
- [11] 许文年, 夏振尧, 周明涛, 等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [12] 章家恩. 生态学常用试验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 湖北 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [14] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [15] 阎慧臻. Logistic 模型在人口预测中的应用[J]. 大连工业大学学报, 2008, 27(4): 333-335.
- [16] 胡亦郑, 黄庆棉, 罗勇. Logistic 模型的预测应用两例[J]. 数学的实践与认识, 2007, 37(16): 138-141.