

经济快速增长区城市用地空间扩展对生态安全的影响

张 健, 高中贵, 濮励杰, 彭补拙*

(南京大学国土资源与旅游学系, 南京 210093)

摘要:目前我国正处于经济快速发展、城市化进程加快阶段, 承受着生态环境恶化的巨大压力, 大多数城市已为环境污染、空间拥挤、绿化率低、秩序混乱等严重的城市问题所困扰。昆山市作为我国经济发展最为活跃的地区之一, 其城市化过程与生态环境安全之间的矛盾更为突出。在总结国内外生态安全和城市生态研究的基础上, 分析城市用地扩展对城市生态安全产生的影响。昆山市城市用地空间扩张经历了缓慢发展期(1949 ~ 1977 年)、老城区改造期(1977 ~ 1985 年)、新区开发期(1985 ~ 1999 年)和快速扩展期(1999 年至今)4 个阶段, 针对城市土地利用变化特征及其城市土地利用存在的问题, 对昆山市城市用地空间扩展进程和模式及扩展的主要特征方面进行剖析。从城市废水、废气和固废排放量几个方面分析了昆山城市用地空间扩展过程中生态环境变化情况, 指出高速工业化、城市化过程, 快速增长的经济可能威胁到昆山城市的生态安全。同时建立城市生态安全评价模式, 构建城市生态安全评价的指标体系, 探讨城市生态安全评价的方法, 评价了昆山市 1985 ~ 2004 年的城市生态安全, 最后对昆山市未来城市生态安全进行预警。为维护昆山市的生态安全, 实现可持续发展提供科学依据。

关键词:城市化; 城市用地扩展; 生态环境效应; 生态安全; 昆山市

文章编号: 1000-0933(2008)06-2799-12 中图分类号: Q147, Q149, Q988 文献标识码: A

The effects of urban land use extension on ecological security in fast-growing economic zone

ZHANG Jian, GAO Zhong-Gui, PU Li-Jie, PENG Bu-Zhuo*

Department of Land Resources and Tourism Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2799 ~ 2810.

Abstract: China is experiencing a period in fast economic development and swift urbanization at present and meanwhile bearing enormous pressure from environment deterioration. Most of the cities have been suffering from such serious urban problems as environmental pollution, crowded space, low greening ratio and chaotic order. As the one of most vibrant economic-developing areas in China, the contradiction between urbanization and ecological security in Kunshan is more outstanding. Based on the summary of domestic and international ecological security and urban ecological study, this paper makes an analysis of the effects of urban land use extension on urban ecological security. Urban land use extension of Kunshan has undergone four stages, namely slow development stage (1949 — 1977), old town alteration stage (1977 — 1985), new area developing stage (1985 — 1999) and fast extension stage (1999 till present). From the aspects of urban waste water, waste gas and solid wastes, the paper makes an analysis of the eco-environmental change during the process of urban land use extension in Kunshan and points out that fast industrialization and urbanization process as well as fast

基金项目:国家自然科学基金资助项目(49831070, 40371106); 江苏省自然科学基金资助项目(BK2005080)

收稿日期:2007-09-05; **修订日期:**2008-03-06

作者简介:张健(1981 ~), 男, 安徽滁州人, 博士生, 主要从事区域规划研究. E-mail: jchangnju@163.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pengbuzhuo@sina.com

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 49831070, 40371106) and the Provincial Natural Foundation of Jiangsu (No. BK2005080)

Received date: 2007-09-05; **Accepted date:** 2008-03-06

Biography: ZHANG Jian, Ph. D. candidate, mainly engaged in regional planning. E-mail: jchangnju@163.com

economic development may threaten the urban ecological security in Kunshan. Meanwhile, the paper sets up an evaluation mode for urban ecological security, constructs the indexes system of urban ecological security evaluation, discusses the method of urban ecological security evaluation and evaluates the urban ecological security from 1985 to 2004 in Kunshan. At last the paper makes an alerting research on the future urban ecological security in Kunshan. In order to improve the ecological security of Kunshan and the economic sustainable development, some beneficial suggestions and countermeasures were put forward.

Key Words: urbanization; urban land use extension; eco-environmental effects; ecological security; Kunshan city

近几十年来,随着全球人地矛盾的日趋尖锐,生态环境在总体上呈现恶化趋势,主要表现为土地退化加剧^[1]、水生态平衡失调^[2]、林草植被破坏严重^[3]、生物多样性锐减^[4]等,生态安全研究已成为当前地学、资源与环境科学以及生态学研究的前沿任务和重要领域^[5]。生态安全问题已使人类面临着发展与生存危机^[6]。城市用地扩展是土地利用/覆被变化的最直接表现之一,同时也是生态安全研究的重点,具体是指由于土地和社会经济压力导致的用地类型和城市空间分布的变化^[7~9]。伴随城市化的快速发展,城市用地扩展及城市土地利用/覆被变化成了土地利用动态变化研究中的重要内容^[10]。国内学者利用遥感和 GIS 方法从城市用地扩展、城市用地类型、城市形态演化及其驱动机制等多方面对全国层面以及快速城市化地区的城市用地扩展进行了广泛研究^[11~13]。江苏省昆山市是江苏省乃至全国城市化过程中较为剧烈的地区之一,由于经济的快速发展和人口的迅速增加,城市开始迅速向各个方向扩展,人地关系矛盾尖锐,城市扩展和土地利用/覆被也出现了不同于以往的复杂变化,影响了城市的生态环境质量,进而影响着城市、经济的可持续发展和社会进步及现代化建设^[14~16]。

本文借鉴国内外的有关城市生态^[17~19]与生态安全^[20~22]研究成果和前沿观点,综合运用 GIS 技术^[23]、景观生态学^[24,25]、城市生态学^[26]、地理学^[27]、循环经济学^[28]等学科理论知识,详细阐述城市用地空间扩展过程中生态环境变化特征,分析生态安全与城市用地空间扩展之间的关系及城市用地空间扩展对城市生态安全产生的影响,并进行生态安全评价^[29]与预警。旨在为该地区生态安全的有效建立提供参考,并为快速工业化和城市化地区生态环境的可持续利用和合理管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区梗概

昆山市地处 120°48'~121°09'E, 31°06'~31°32'N 之间,位于江苏省东南部,北至东北与常熟市及太仓市相连,南至东南与上海嘉定、青浦两区接壤,西与吴江、苏州交界(图 1)。国土总面积 921.3 km²,其中平原面积 643.2 km²,水域面积 278.1 km²,耕地面积 410 km²。地面高程多在 0.2~5.6 m 之间。2004 年全市国内生产总值 570×10⁸ 元(当年价格),占江苏省国内生产总值 3.67%,人均地区生产总值 90714 元,居江苏省第一位。财政收入 31.54×10⁸ 元,进出口总额 238×10⁸ 美元,全社会固定资产投资 205×10⁸ 元,社会消费品零售总额 75.50×10⁸ 元,在岗职工平均工资 20099 元,农民人均纯收入 7655 元。2000~2004 年经济发展加速度分别为 -0.03、-0.04、0.06、0.02 和 0.01(图 2)。一、二、三产业结构由 1994 年 10.1:54.2:35.7 变为 2004 年的 1.4:68.4:30.2。全市 2004 年总人口 65.46×10⁴ 人。在国家统计局公布的 2005 年全国百强县(市)排名中,昆山位居第一。

1.2 研究方法

区域生态系统是由多因子组成的多层次复杂体系和开放系统^[30],系统内部各因子以及系统与外部环境之间有着密不可分的联系和相互作用。为了避免因选取不适当的评价指标,导致评价结果偏离实际,本文综合考虑各方面影响因素和参考相关文献^[31],分析区域城市用地空间扩展特征,结合研究区域生态系统的具体特点,利用综合评价模型方法进行定量评价。综合评价模型方法作为定性和定量相结合的方法,对复杂系统

的评价和分析非常有效,其评价范围的确定能充分考虑人的主观判断,对研究对象进行定性与定量分析。综合评价模型方法将研究对象看成一个系统进行综合分析,建立概念清晰、层次分明、逻辑合理的指标体系和层次结构,具有科学性、系统性、完整性和层次性的特点^[32]。最终得到研究区域生态安全状况。文中所用数据来自于昆山市历年国土资源部门的土地利用变更数据、环保部门的环境公报及统计部门的统计材料。

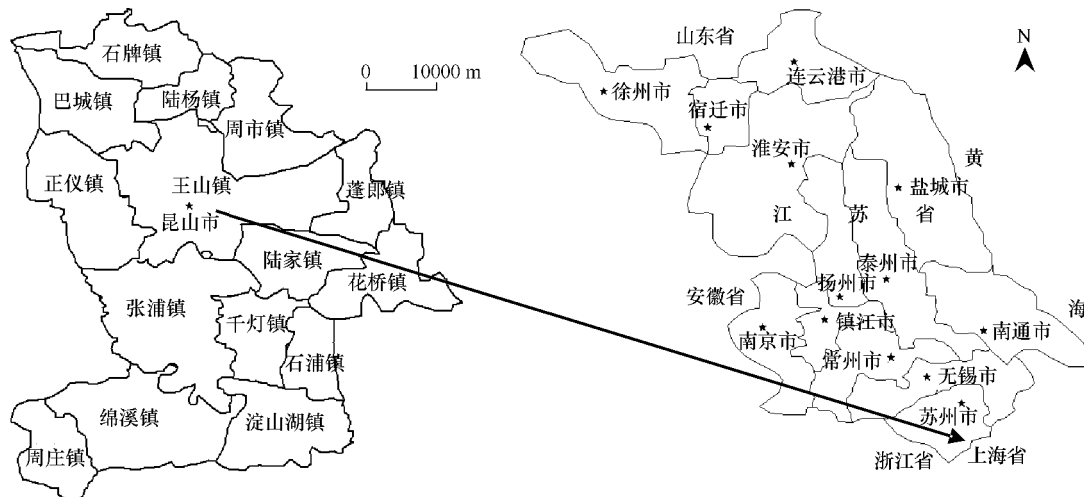


图1 研究区域范围

Fig.1 The scope of study area

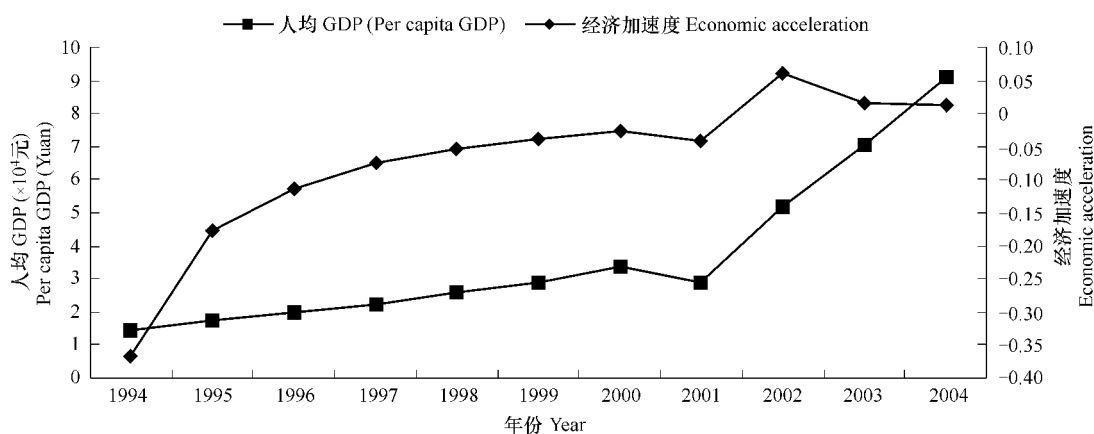


图2 昆山市1994~2004年人均GDP与经济加速度

Fig.2 Per capita GDP and economic acceleration of Kunshan City from 1994 to 2004

2 城市用地扩展特征分析

2.1 城市土地利用特点

(1) 土地综合产出率高

昆山市处于我国经济活动最为活跃的长江三角洲前沿,对前来投资的外商具有强大的吸引力。随着工业水平提高,昆山市的基础设施也越来越完备,劳动力素质不断提高。该区土地开发强度远远高于全国平均水平,土地开发利用超过57%,全区以单位土地面积完成的全社会固定资产投资总额表示的土地固定资产投资强度远远高于全国平均强度。高强度的土地开发带来极高的土地综合产出率,1994~2004年,昆山市地均GDP产出由 9.04×10^4 元/hm²提高到 61.49×10^4 元/hm²,其中单位建设用地的非农产值从 53.19×10^4 元/hm²提高到 117.87×10^4 元/hm²,产值从 1.70×10^4 元/hm²提高到 2.83×10^4 元/hm²。

(2) 城市用地功能分区明显

昆山市域土地利用结构的现状受区位条件和社会经济发展状况的制约,可划分为四个类型区,且各区之间的土地开发利用情况差异较大。①城市及城郊类型区(包括正仪、玉山、蓬郎、陆家四镇),区域居民点、工矿用地和交通用地比例最大,并具有强烈的需求趋势;②北部旅游类型区(包括巴城、陆杨、周市、石牌四镇),区域内耕地所占比重最大,全市 1/3 以上的耕地分布在这一区域,但是耕地减少的速度较快,交通用地和林地比重较大,未利用地较少,开发利用潜力不大;③中部工业用地类型区(包括张浦、千灯、石浦、花桥四镇),区域林地比例最大,耕地比例小,未利用地占全市的一半以上,但开发利用的难度较大;④南部旅游类型区(包括周庄、锦溪、淀山湖三镇),区域水域比重最大,其中有大面积的滩涂可利用。此外,居民点、工矿用地、交通用地也有较高的比例,且具有较大的需求量。

(3) 耕地急剧减少,土地生态环境压力增大

在推进城市化过程中,城市用地扩张占用大量土地。城市土地利用规模失控,主要表现在开发区的设立和建设上。同时还表现在城乡结合部的土地利用既占用了农用地,又造成环境污染。1978~2004 年,昆山市的耕地从 58700.2 hm^2 减少到 45800.29 hm^2 ,年均减少 1.04%,近年来昆山总人口的持续增长,人均耕地从 1978 年的 0.11 hm^2 下降到 2004 年的 0.07 hm^2 ,且仍有下降趋势(未考虑外来人口),人地矛盾进一步加剧^[33]。昆山作为一个新兴的快速发展城市,城市用地规模的扩张和农业用地的锐减有其历史的必然,但这种高速的城市扩张和大量农业生态用地的被侵占,也引发了许多环境问题:城市建设用地过度集中,市区人口、建筑和厂矿密度过高,而城市交通、生态绿化用地不足等。此外,城市用地扩展过程中过量开采地下水可能导致地下水位下降^[34,35]。

2.2 城市用地空间扩展分析

昆山市自经过 1978 年开始的老城区改造、1985 年东侧经济技术开发区的开辟和 1986 年城南乡的并入,城区面积自 1982 年的 5.36 km^2 扩张至 2004 年的 52.6 km^2 ,增加了近 10 倍。昆山市现代城市空间的扩展大致可以分为 4 个阶段:①缓慢发展期(1949~1977 年)。这一阶段的城市空间在调整中有所扩展;②老城区内部更新改造期(1977~1985 年)。昆山市加强了老城区改造建设为重点的各项城市建设,同时大力进行道路建设,以缓解因城区人口大量增加而带来的住房紧张、交通紧张等问题,并使城市建设逐步走上稳步发展的轨道;③新区开发期(1985~1999 年)。昆山城市扩展主要来源于这个区域经济发展等外部驱动力的影响(如工业开发区等),而非人口增长导致城市规模扩大等内在驱动因子的需求。因此,其城市扩展的速度明显超过人口增长的速度;④快速扩展期(1999 年至今)。这一阶段是昆山市城市建设飞速发展时期,昆山市独特区位优势日趋显现出来,尤其是 1989 年昆山撤县建市后,受到上海和苏州等城市经济发展强力辐射,昆山市经济开始迅猛发展,城市建设面积迅速扩张(图 3)。

3 城市用地扩展中生态环境效应分析

3.1 环境质量现状分析

昆山市作为新兴的工商城市,其快速的经济发展和城市化必然促进城市用地迅速扩展,从而带来一系列生态环境问题。为此,昆山市政府及相关部门制定了大量的相关调控措施:一方面,以科学发展观为指导制定产业发展政策,明确产业导向,注重发展技术含量高、污染少的高新技术项目,推动经济结构优化和生产方式的转变;另一方面,切实加强水、气、声环境综合治理,实行污染物总量控制,坚持总量平衡原则审批项目,并强化日常监督管理,促进企业治理污染的自觉性。使得昆山市在经济和城市化得到高速发展的同时,环境质量没有出现恶化的趋势,各项环境指标比较稳定,其中饮用水源水质达标率、城市地面水水质达标率、烟尘控制区覆盖率、工业废水排放达标率等指标 1999 年之后均达到 100%。

3.1.1 地面水环境质量现状分析

1996~2004 年,昆山市工业用水量不断上升,但由于工业废水得以循环利用,其新鲜用水量几乎不变,而重复用水量则稳步上升。2004 年工业用水量为 $11655.84 \times 10^4 \text{t}$,新鲜用水量 $6212.25 \times 10^4 \text{t}$,重复用水量为 $5443.60 \times 10^4 \text{t}$ 。全市 116 家重点工业企业废水排放总量 $5014.55 \times 10^4 \text{t}$ 。1996~2004 年工业废水污染物排放

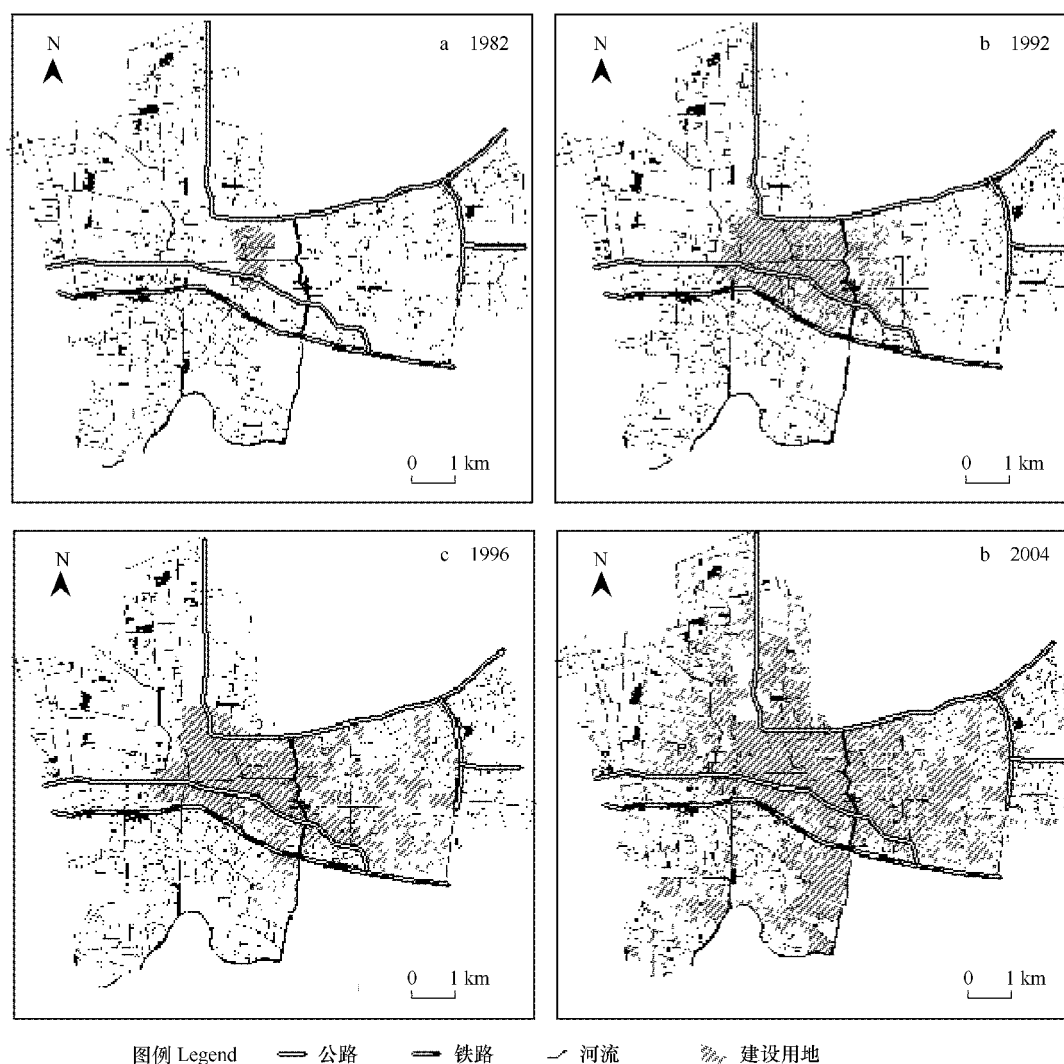


图3 不同年份昆山市城市用地规模比较

Fig. 3 The scale of urban land use of Kunshan City in the different years

量总体呈下降趋势,其中化学需氧量和悬浮物排放量呈直线下降,六价铬和铅排放量近两年来有上升趋势。2004年工业废水主要污染物排放量为:化学需氧量 19432.77 t、石油类 14.41 t、挥发酚 0.02 t、六价铬 0.47 t、氰化物 2.72 t、铅 0.08 t。

3.1.2 城区大气环境质量现状分析

2004年昆山116家重点调查工业企业废气排放量为 $193.45 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中燃烧废气 $88.48 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总废气量 45.74%;工艺废气排放量 $104.97 \times 10^8 \text{ m}^3$,生产工艺废气经净化处理的废气量为 $104.97 \times 10^8 \text{ m}^3$,净化处理率 100%。全市工业废气主要污染物排放量中, SO_2 排放量为 9644.96 t,去除量为 7423.57 t,排放达标率为 100%;工业粉尘排放量 1043.14 t,去除量为 1017.12 t,排放达标率为 100%。2004年昆山市大气环境质量较好,城区大气主要指标 SO_2 、 NO_x 、 PM_{10} 年日均浓度符合《环境空气质量标准》(GB3095-1996)二级标准。从3项污染物的负荷系数来看,可吸入颗粒物居首, SO_2 次之, NO_x 居末,粉尘已成为城区大气主要污染物。综合近几年数据,空气综合污染指数不断升高, SO_2 与可吸入颗粒物指数不断上升, NO_x 持续下降。2000~2004年全市区 SO_2 年日均浓度均超过《环境空气质量标准》(GB3095-1996)一级标准,但均低于二级标准,而颗粒物年均值已在二级标准附近徘徊,成为昆山首要的污染物。

3.1.3 固体废弃物

2004 年昆山 116 家重点工业企业固废产生量为 $18.95 \times 10^4 \text{ t}$, 其中危险固体 10797.86 t, 工业废物综合利用量为 $18.14 \times 10^4 \text{ t}$, 综合利用率为 95.72%。1996 ~ 2004 年昆山工业固废均为零排放。其中炉渣为主要废弃物, 1997 ~ 2004 年炉渣占总固体废物量依次为 79.7%、72.6%、86.7%、86.2%、77.9%、88.6%、78.9% 和 58.0%。工业固废主要来自化工原料及化学制造业、纺织业、非金属矿物制品业和医药制品业等四大行业。“九五”期间 4 个行业固废产生量占总固废比例依次为: 53.0%、19.1%、11.6% 和 8.7%。1997 ~ 2004 年昆山市区生活垃圾年产量分别为 5.1×10^4 、 5.6×10^4 、 7.2×10^4 、 7.5×10^4 、 8.1×10^4 、 8.84×10^4 、 $12.24 \times 10^4 \text{ t}$ 和 $16.91 \times 10^4 \text{ t}$ 。

3.2 城市用地扩展与生态环境变化关系

城市土地资源的利用与生态环境保护的问题实质是生态环境与经济发展的关系, 在市场经济下, 两者的协调不可能自动实现^[36]。由于土地资源的供给不足, 经济投入的主体不可能以经济发展与生态环境的协调作为自己的经济行为的约束, 而很可能加紧开发土地资源来应付短缺土地资源的供给不足, 这进一步加大了土地利用与生态环境协调之间的困难。通过对比昆山市 1982 ~ 2004 年建设用地面积的增长与工业废水排放总量、工业粉尘排放总量、工业废气排放总量和工业固废排放总量之间的关系可以发现, 它们之间具有较明显相关性(图 4)。

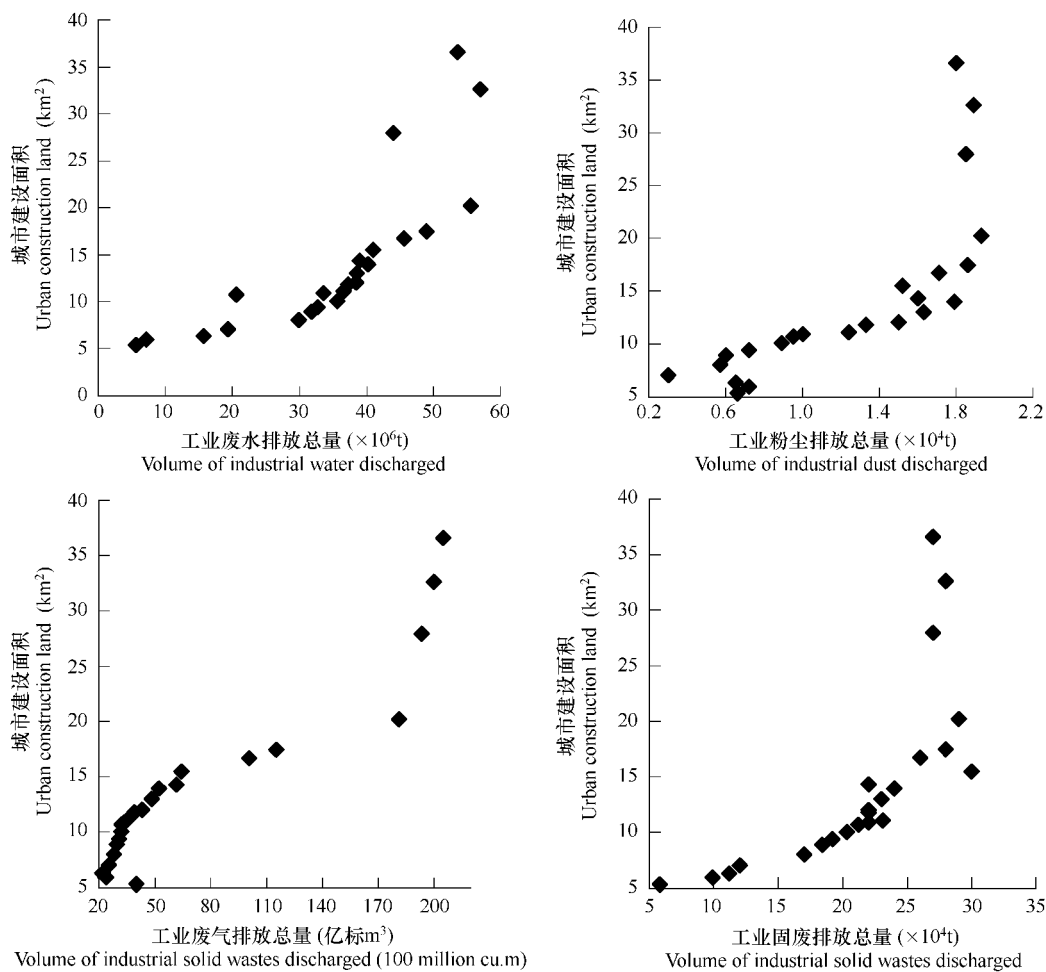


图 4 1982 ~ 2004 年昆山市城市建设面积与工业废水、工业粉尘、工业废气、固废排放总量关系

Fig. 4 Relationship of urban construction land and total discharge amount of industrial waste water, industrial dust, industrial waste gas, industrial solid wastes of Kunshan City from 1982 to 2004

在经济高速发展导致的城市用地扩展过程中,昆山市污染物的排放总量与建设用地扩张呈正相关性,城市建设规模越小,相关性越强。当建设面积超过 25 km^2 时,污染物与建设用地面积的散点图偏离相关函数。主要原因是政府在近几年加大了环保管理和投入,严格控制污染排放总量,提高科技含量,实行物资综合循环利用。此外,政府部门在严格审核企业污染排放达标率的同时对不同的产业进行了合理的布局,这样更加有利于对污染物的处理与回收利用。

4 生态安全评价

4.1 生态安全评价内容

城市生态安全的本质,应围绕城市乃至周边地区人们可持续发展的目的,促使经济、社会和自然生态的协调统一^[37,38]。由于城市生态系统的特殊性,人口的增长和经济的发展,使城市内部生物、生态环境和生态系统遭到了空前的冲击与破坏,某些破坏已经达到甚至超过了城市的生态承受力,有些已经达到了不可逆转的地步,而城市内部的生态破坏反过来又影响到城市乃至一个国家人类的健康生活和社会的可持续发展^[39~41]。对生态安全的评价,可从各个层次进行,而不仅是在种群层次进行^[42]。在生态安全的评价分析中,应先从层次结构的角度分析开发活动对城市生态系统的结构形态的影响,再从功能的角度分析开发活动对区域生态系统内部功能关系的影响,最后从层次角度或从功能角度综合评价开发活动对城市生态系统造成的影响与生态安全状况^[43]。

城市生态安全的目标是控制人口和经济增长对城市生态系统的制约,通过对城市生态安全评价研究和分析,维持城市生态系统的完整性和稳定性,确保城市生态健康与服务功能的可持续性。城市生态安全状态分析和影响预测主要是为城市生态管理决策提供信息,并为预警系统建立起相关机制与应用决策^[44]。主要包括:①生态安全的现状及发展,评价者应该向有关部门决策者提供相关的生态安全信息;②影响生态安全的安全阈值及时序、规模,确定主要影响因子及影响的规模和程度,对区内与区外的影响。所谓安全阈值是指在保持其正常功能的情况下,生态系统的结构所能承受的干扰的强度。通过测定生态系统所提供的服务质量和数量的变化所确定的安全阈值,可检测生态系统的结构与功能的变化及其对生态系统服务的质量和数量所受到的干扰,根据这些干扰的“类型—强度—空间位置”做出生态系统受威胁的判别,从而进行“生态安全预警”。

4.2 综合评价模型

通过建立指标体系及对所选取指标进行无量纲化后,对研究区生态安全进行综合评价。在多维指标构成的城市生态空间中,只要有一种指标不能满足城市生态系统平衡的最低要求,即有一种生态安全指标的生态位受到破坏,整个城市生态位则遭受破坏。为了使城市生态安全评价制度化、经常化,综合评价应建立城市生态安全的年度评价模型和年际评价模型。假设年度评价设置指标体系中共有 n 项指标,分别记为 $X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)$,其中 t 为年度。记 $X(t) = [X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)]$,构造如下函数:

$$P(t) = F[X(t), A(t)] = \sum_{i=1}^n W_i f[X_i(t)]$$

式中, $P(t)$ 为城市生态安全水平评估值, W_i 为第 i 种风险因素权重, $f[X_i(t)]$ 为第 i 指标标准化的一个无量纲数值。

城市生态安全是贯穿始终的一种状态或过程,上式中 $P(t)$ 只反映某一时间点上(如年度)生态安全水平,而不能反映生态安全某一阶段的动态水平,因此,需建立一个动态模型以反映城市生态安全的年际变化情况:

$$G(t) = M[P(t), P(t-1), \dots, P(t-n)]$$

式中, M 为时间段 n 年 $P(t), P(t-1), \dots, P(t-n)$ 的一种均值函数,即:

$$M = \sum_{i=1}^{n-1} |V_i - \bar{V}| / (N-1) \bar{V}$$

式中, $V_i = P_{i+1}/P_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 是年度城市生态安全水平综合评价值的动态序列环比速度。 $\bar{P} = \sqrt[n-1]{P_1 P_2 \dots P_{N-1}}$ 为动态序列的几何平均值。 $G(t)$ 为年度生态安全水平指数动态序列的环比速度的平均相对变动率,其值越小,表示生态安全水平越高。利用年度评价与年际评价相结合的综合评价值的递增性和年

度动态序列的稳定性,可追踪城市土地扩展进程中生态安全水平变化的过程。将城市生态安全分为理想状态、良好、一般、较差和恶化 5 个等级,分别定量记为 I (0.8 ~ 1)、II (0.6 ~ 0.8)、III (0.4 ~ 0.6)、IV (0.2 ~ 0.4) 和 V (0 ~ 0.2)。

4.3 综合评价结果分析

(1) 不同年份生态指数分析

通过计算得出昆山市在用地扩展过程中各年份的生态安全综合指数(表 1),其生态安全指数发展趋势呈 U 形分布(图 5),其中 1985 年生态安全的综合指数最高,为 0.7353,该年的城市生态也相对较安全。2001 年生态安全综合指数最低,仅为 0.6685,但该年城市生态安全水平仍处于良好水平,城市生态处于控制范围之内。昆山市生态安全综合指数基本处于 II 级的良好水平,而城市生态安全的子系统则分别处于 I、II、III 不同的等级。

(2) 不同生态安全子系统分析

昆山市城市生态安全子系统中固废处理指数最高,其中 1995 年达到 0.9648,主要原因是昆山市历年的生活垃圾无害化处理与工业固体废物综合利用率均处于国内较高的水平。用地结构水平、大气环境水平和水环境水平均呈 U 型发展趋势,先后经历了恶化、调整、优化的过程,1985 年 3 个子系统的现状均处于较为和谐的状态,随着昆山市经济快速的发展,城市用地面积急剧扩张,用地结构朝不平衡方向发展,也引起了一系列的生态环境问题,其中大气环境和水资源是环境问题的主要载体,各种环境监测指标也不容乐观,1995 年和 2001 年三者的生态安全指数处于生态安全的一般水平,如不加以控制和管理,极易导致生态恶化,危及城市可持续发展。相反,城市生态安全的经济发展子系统则呈倒 U 型,1985 年昆山经济发展速度相对较慢,而 2000 后期发展速度又过快,且昆山市的产业结构越来越偏向于工业发展,这些都给昆山市生态安全带来了巨大的压力和隐患。城市绿化子系统生态安全指数历年来持续朝好的方向发展,2004 年其生态安全指数达到 0.8232,昆山市政府在城市建设过程中对城市绿化投入逐年增加,并结合昆山市内部的环境与周边的自然生态系统,规划建设城市的绿地系统,取得了良好的效果,城市绿地各项指标,如人均绿地面积、绿地覆盖面积和人均公共绿地面积等指标均持续增加。噪音控制指数表现持续下降的趋势,其值由 1985 年的 0.8765 下降为 2004 年的 0.5138。

表 1 昆山市城市用地扩展过程中生态安全指数变化

Table 1 The variation of ecological security index during urban land expansion in Kunshan City

年份 Year	用地结构 Land structure	经济发展 Economic development	城市绿化 City afforestation	大气环境 Atmospheric environment	水环境 Water environment	噪音控制 Noise control	固废处理 Solid waste disposal	综合指数 Comprehensive index
1985	0.7678	0.5786	0.5456	0.7456	0.8058	0.8765	0.9278	0.7353
1990	0.6546	0.6348	0.6547	0.6353	0.7387	0.7654	0.9245	0.6994
1995	0.5049	0.7645	0.6989	0.5785	0.6785	0.6451	0.9648	0.6700
2001	0.6647	0.6891	0.7237	0.5045	0.6104	0.6430	0.9215	0.6685
2002	0.7123	0.5634	0.7564	0.6894	0.7895	0.5801	0.8867	0.7089
2003	0.7047	0.5123	0.8043	0.7196	0.7844	0.5343	0.9575	0.7132
2004	0.7033	0.4833	0.8232	0.7354	0.7817	0.5138	0.9485	0.7213

5 生态安全的影响预警

要构建一个具有操作意义的城市生态安全预警系统,首先要从理论上解决建模原则和方法问题。预警系统的构建^[45,46],必须具备 5 个基本功能:描述功能、解释功能、评价功能、预测功能和对策功能。预警系统的构成的前提是要有迹可寻,有规律可循,必须对警情发生机制有所了解。可持续发展的预警,由于受人们主观认识的限制和影响,往往具有反因果性和非线性等独有的特点,根据其区域的实际情况,按照设计预警指标→明确警情→寻找警源→分析警兆→预报警度的思路进行分析。本文结合目前国内外研究进展^[47,48],综合考

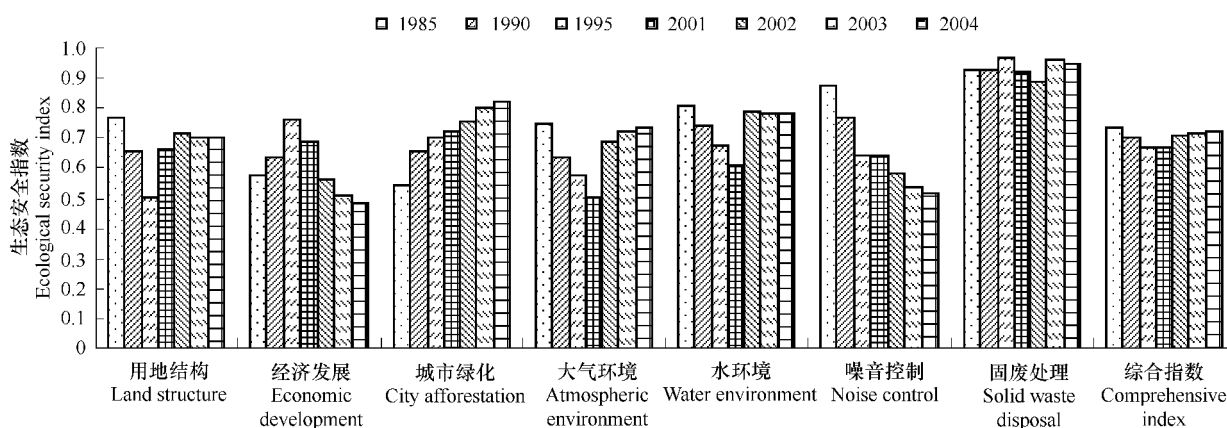


图5 昆山市生态安全评价的子系统及综合指数

Fig. 5 The subsystem and comprehensive index of ecological security assessment in Kunshan City

考虑研究区域的生态特点,将生态安全的预警标准平均分为5个范围:“理想状态”:0.8~1;“良好”:0.6~0.8;“一般”:0.4~0.6;“较差”:0.2~0.4;“恶劣”:0~0.2,同时用无警(绿灯)、轻警(蓝灯)、中警(黄灯)、重警(粉灯)和巨警(红灯)5种尺度表示不同警度。

2004年后的预警数据采用指数回归模型对各指标运行趋势进行外推预测,其模型为:

$$Y_i = Y_{i0} \times (1 + X_i)^T$$

式中, Y_{i0} 为*i*指标的基准年值, X_i 为前5年的平均增长率, T 为预期年限。本文将1995年作为基准年,把2010年作为目标年,对2004年以后各年度的预测数进行计算,得出各年度的综合得分值和警度情况。

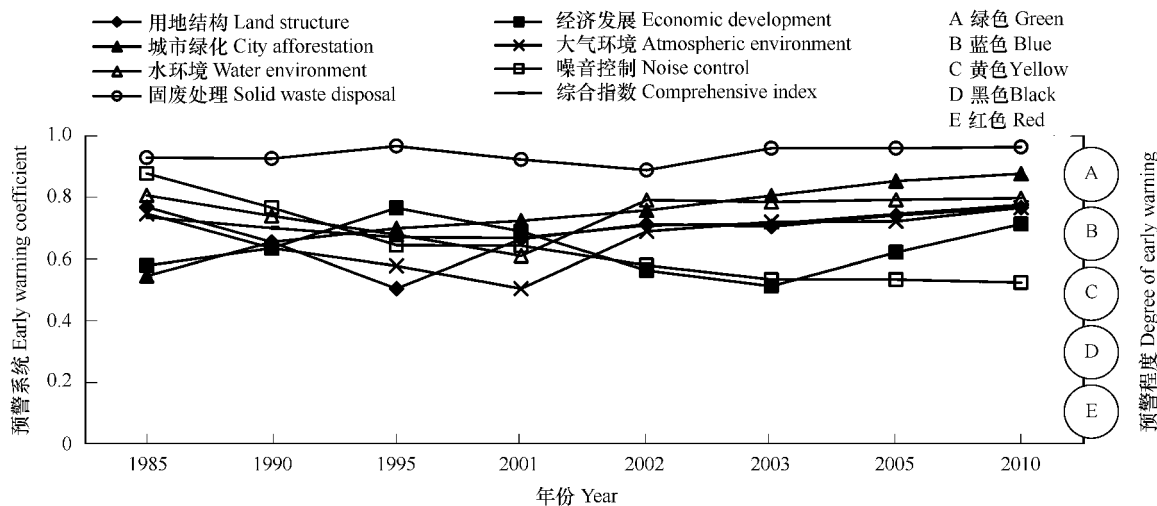


图6 昆山市城市用地扩展过程中生态安全预警结果

Fig. 6 The results on early-warning of ecological security during urban land expansion in Kunshan City

根据城市生态安全预警的模型及所确定的警限、警度及灯区的对应关系,可得出昆山市生态安全历年及各生态安全子系统的预警图(图6)。昆山市2004年之前城市生态安全状态虽不停波动发展,但一直处于轻警(蓝灯)状态,且趋向无警方向发展。城市生态安全子系统中固废处理一直处于无警状态,对城市总体生态安全水平的贡献较大,其他子系统则大多介于中警(黄灯)与轻警(蓝灯)之间,其中城市绿化于2004年已达到无警状态,且发展趋势良好。

6 结论

(1)城市是一个动态演化中的复杂巨系统,其构成要素总是在不断的相互作用并符合一定程度的空间力

学特征。城市用地扩展包括城市规模、城市空间形态和城市用地结构 3 方面,它是基于形态演化的一个渐进过程。城市化的发展一方面推动了经济、文化、教育、科技和社会的不断发展,把人类社会的物质文明和精神文明推向新的阶段;另一方面由于城市人口的增长、城市规模的不断扩大、工业、建筑的高度集中也必然带来一系列城市问题;

(2)对昆山市不同阶段城市用地扩展异向性分析结果表明:昆山市城市土地扩展与城市化和工业化地发展速度具有较强的耦合性,1996~2004 年昆山市城市土地扩展距离的平均值最大,1982~1992 年城市扩展平均距离最小。城市工业用地扩展的空间形态以块状式蔓延为主,工业用地扩展同时兼具较明显的空间离散性和轴向集中性。20 世纪 90 年代以来,昆山市以工业用地形式为主的新开发区建设是整个区域城市土地利用扩展的主要动因。

(3)通过分析昆山市城市废水、废气和固废排放量几个方面的变化特征,了解其城市用地扩展过程中生态环境状况。由于土地资源的供给不足,经济投入的主体不可能以经济发展与生态环境的协调作为自己经济行为的约束,而很可能加紧开发土地资源来应付短缺土地资源的供给不足。在政府加大环保管理和投入之前,昆山市历年建设面积的增长与工业废水排放总量、工业粉尘排放总量、工业废气排放总量和工业固废排放总量之间具有较明显的相关性。城市用地扩展导致的生态环境问题引起了人居环境、景观生态、水资源生态、大气生态和土壤生态等一系列效应。

(4)对昆山市 1985~2004 年的城市生态安全进行评价,通过计算结果表明:昆山市在用地扩展过程中各年份的生态安全综合指数发展趋势呈 U 形分布,其中 1985 年生态安全的综合指数最高,2001 年城市生态安全综合指数最低,但城市生态安全水平均处于良好水平,城市生态处于可控制范围之内,昆山市生态安全综合指数基本处于 II 级的良好水平,而城市生态安全的子系统则分别处于 I、II、III 不同的等级。总体上,昆山市城市生态安全水平发展趋势将在平稳中提高,不会出现极为严重的生态问题。但由于人类活动的不断加剧,昆山市的生态环境质量必将遭到一定影响,应对昆山市生态安全问题继续给予高度重视,积极采取生态恢复和重建对策,维护昆山市的生态安全,最终实现昆山市可持续发展。

References:

- [1] Chen F, Pu L J, Peng B Z, *et al.* The effect of land use changes on soil conditions in Korla City, Xinjiang. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(8): 1290—1295.
- [2] Zhang Q L, Shi X Z, Pan X Z, *et al.* Characteristics of spatial-temporal changes of soil fertility in Jintan, Jiangsu Province. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(2): 315—319.
- [3] Burch H, Forster F, Schleppi P. The influence of forest cove on the hydrology of catchments in the Alptal valley. *Schweizerische-Zeitschrift-fur-Forstwesen*, 1996, 147 (12): 925—938.
- [4] Garten, Charles T, Ashwood, *et al.* Modeling soil quality thresholds to ecosystem recovery at Fort Benning, GA, USA. *Ecological Engineering*, 2004, 23(4-5): 351—369.
- [5] Wang G, Wang L, Wu W. Recognition on regional ecological security definition and assessment system. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(4): 1627—1637.
- [6] Ren Z Y, Huang Q, Li J. Quantitative analysis of dynamic change and spatial difference of the ecological safety: the case of Shanxi Province. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(4): 597—606.
- [7] Gillies R R, Boxb J B, Symanzik J. Effects of urbanization on the aquatic fauna of the Line Greek waters-hed, Atlanta satellite perspective. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 86(3): 411—412.
- [8] Raucoules D, Mouelic S, Carnec C, *et al.* Urban subsidence in the city of Prato(Italy) monitored by satellite radar interferometry. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(4): 891—897.
- [9] Hong S K, Song I J, Kim H O, *et al.* Landscape pattern and its effects on ecosystem functions in seoul metropolitanare: Urban ecology on distribution of the naturalized plant species. *Journal of Environment Science*, 2003, 15(12): 199—204.
- [10] Xiao J Y, Shen Y J, Ge J F, *et al.* Evaluating urban expansion and land use change in Shijiazhuang, China, by using GIS and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 75(1): 69—80.

- [11] Liu J Y, Zhan J Y, Deng X Z. Spatio-temporal patterns and driving forces of urban land expansion in China during the economic reform era. *Ambio*, 2005, 34(6): 444—449.
- [12] Li X W, Fang J Y, Piao S L. The comparison of spatial characteristics in urban land use the central and sub-cities in Shanghai Region. *Geographical Research*, 2003, 22(6): 769—779.
- [13] Huang Y, Chen X, Bao A M, *et al.* Urban sprawl pattern and spatial features of Uer mqi City during the last 15 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, 28(3): 364—370.
- [14] Li Y B, Chen W, Li R D. Simulation of regional urbanization and eco-environment coupling and regulation policies. *Geographical Research*, 2007, 26(1): 187—196.
- [15] Grossman G, Krueger A. Economic growth and the environment. *Quarterly Journal of Economics*, 1995, 110(2): 353—377.
- [16] Ursula O S. The future of humanity: human, gender and ecological security. *Journal of Peace Psychology*, 2000, 6(3): 229—235.
- [17] Dyson J S. Ecological safety of paraquat with particular reference to soil. *Planter*, 1997, 73(5): 467—468, 471—474, 477—478.
- [18] Dennis P. Social evolution and ecological security. *Bulletin of Peace Proposals*, 1991, 22(3): 329—334.
- [19] Kullenberg G. Regional co-development and security: a comprehensive approach. *Ocean & Coastal Management*, 2002, 45: 761—776.
- [20] Ren Z Y, Zhang Y F, Li J. The value of vegetation ecosystem services: a case of Qinling-Daba Mountains. *Journal of Geographical Sciences*, 2003, 13(2): 195—200.
- [21] Calow P. Critics of ecosystem health misrepresented. *Ecosystem Health*, 2000, 6(1): 3—4.
- [22] Rob S. Security risks of global environmental changes. *Global Environmental Change*, 1996, 6(3): 187—192.
- [23] Tang X M, Zhao G X, Lu Q B. Ecological environment evaluation of cultivated land in coastal intensive agricultural areas by GIS. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(5): 69—74.
- [24] Watt A S. Pattern and process in the plant community. *Journal of Ecology*, 1947, 35: 1—22.
- [25] Wiens J A, Stenseth N C, Horne B V, *et al.* Ecological mechanisms and landscape ecology. *Oikos*, 1993, 66: 369—380.
- [26] Wang R S. The frontiers of urban ecological research in industrial transformation. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 830—840.
- [27] Zheng D. A study on the regionality and regional differentiation of geography. *Geographical Research*, 1998, 17(1): 4—9.
- [28] Bai L, Bai Y X, Xue Y W, *et al.* Circular economy beforehand evaluation of provinces and regional diversity. *Scientia Geographica Sinica*, 2007, 27(2): 149—155.
- [29] Zhang H, Ma W G, HO H H. Recent advances in research on LUCC: based urban ecological security. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2109—2117.
- [30] Porter E, Johnson S. Translating science into policy: Using ecosystem thresholds to protect resources in Rocky Mountain National Park. *Environmental Pollution*, 2007, 149(3): 268—280.
- [31] Zhao Y L, Zhang L J. A study on index and method of quantitative assessment of fragile environment. *Progress in Geography*, 1998, 17(1): 67—72.
- [32] Liu S L, Guo X D, Lian G, *et al.* Multi-scale ecological security evaluation of typical fragile areas in the Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1554—1559.
- [33] Yang Y, Wu C F, Wei S C. Research on the stage features of man-land relationship and adjustable strategies. *China Pollution. Resources and Environment*, 2007, 17(1): 61—65.
- [34] Xiong G P. The export-oriented economy and urban development. *City Planning Review*, 2001, 25(1): 34—37.
- [35] Long H L, Cai Y L, Wan J. Sustainability evaluation of land use in development zone; the case of Kunshan. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(6): 719—728.
- [36] Yang D H. Establishing restraint mechanism on city environment. *Planners*, 2001, 17(4): 82—86.
- [37] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* National natural capital accounting with the ecological footprint concept. *Ecological Economics*, 1999, 29: 375—390.
- [38] Wackernagel M, Lewan L, Hanson C B. Evaluating the use of natural capital with the ecological footprint: applications in Sweden and subregions. *Ambio*, 1999, 28(7): 604—612.
- [39] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: reducing human impact on the earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.
- [40] Wackernagel M, Onisto L, Bello P, *et al.* Ecological footprint of nations. Toronto: International Council for Local Environmental Initiatives, 1997.
- [41] Haining R. Spatial data analysis. Cambridge University Press, 2003.
- [42] Zhao Y Z, Zou X Y, Cheng H, *et al.* Assessing the ecological security of the Tibetan plateau: Methodology and a case study for Lhaze County. *Journal of Environmental Management*, 2006, 80(2): 120—131.
- [43] Huang Q, Wang R H, Ren Z Y, *et al.* Regional ecological security assessment based on long periods of ecological footprint analysis. *Resources*,

Conservation and Recycling, 2007, 51(1): 24—41.

- [44] Rossi R. Nature and landscape production potentials of organic types of agriculture: A check of evolution criteria and parameters in two Tuscan farm-landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 77(1): 53—64.
- [45] Liu S Q, Chen G J, Chen Z J. Warning on mountain complex ecosystem in the Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Mountain Research*, 2002, 20(3): 302—306.
- [46] Chen Z J, Chen G J. Study on warning system of environmental impact assessment. *Environmental Science*, 1992, 13(4): 20—23.
- [47] Liu S Q, Chen G J, Chen Z J. Ecological and environmental warning on rural habitat ecosystem: A case study of group 5 of Cizhu Village in Wanxian City. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(2): 295—301.
- [48] Xu X G. Study on evaluation and pre-warning of ecological environment in the Yellow River Delta. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 461—468.

参考文献:

- [1] 陈浮, 濮励杰, 彭补拙, 等. 新疆库尔勒市土地利用变化对土壤性状的影响研究. *生态学报*, 2001, 21(8): 1290~1295.
- [2] 张庆利, 史学正, 潘贤章, 等. 江苏金坛市土壤肥力时空变化特征. *土壤学报*, 2004, 41(2): 315~319.
- [5] 王耕, 王利, 吴伟. 区域生态安全概念及评价体系的再认识. *生态学报*, 2007, 27(4): 1627~1637.
- [6] 任志远, 黄青, 李晶. 陕西省生态安全及空间差异定量分析. *地理学报*, 2005, 60(4): 597~606.
- [11] 刘纪远, 战金艳, 邓祥征. 经济改革背景下中国城市用地扩展的时空格局及其驱动因素分析. *人类环境杂志*, 2005, 34(6): 444~449.
- [12] 李晓文, 方精云, 朴世龙. 上海及周边主要城镇城市用地扩展空间特征及其比较. *地理研究*, 2003, 22(6): 769~779.
- [13] 黄粤, 陈曦, 包安明, 等. 近 15a 乌鲁木齐城市用地扩展动态及其空间特征研究. *冰川冻土*, 2006, 28(3): 364~370.
- [14] 刘耀彬, 陈斐, 李仁东. 区域城市化与生态环境耦合发展模拟及调控策略——以江苏省为例. *地理研究*, 2007, 26(1): 187~196.
- [23] 唐秀美, 赵庚星, 路庆斌. 基于 GIS 的滨海集约农区耕地生态环境评价研究. *农业工程学报*, 2007, 23(5): 69~74.
- [26] 王如松. 转型期城市生态学前沿研究进展. *生态学报*, 2000, 20(5): 830~840.
- [27] 郑度. 关于地理学的区域性和地域分异研究. *地理研究*, 1998, 17(1): 4~9.
- [28] 白露, 白永秀, 薛耀文, 等. 中国省区循环经济预评估及区域差异研究. *地理科学*, 2007, 27(2): 149~155.
- [29] 张浩, 马蔚纯, HO Hon Hing. 基于 LUCC 的城市生态安全研究进展. *生态学报*, 2007, 27(5): 2109~2117.
- [31] 赵跃龙, 张玲娟. 脆弱生态环境定量评价方法的研究. *地理科学进展*, 1998, 17(1): 67~72.
- [32] 刘世梁, 郭旭东, 连纲, 等. 黄土高原典型脆弱区生态安全多尺度评价. *应用生态学报*, 2007, 18(7): 1554~1559.
- [33] 杨杨, 吴次芳, 韦仕川. 浙江省人地关系变化阶段特征及调整策略. *中国人口, 资源与环境*, 2007, 17(1): 61~65.
- [34] 熊国平. 外向型经济与城市拓展——以昆山市为例. *城市规划*, 2001, 25(1): 34~37.
- [35] 龙花楼, 蔡运龙. 开发区土地利用的可持续性评价——以江苏昆山经济技术开发区为例. *地理学报*, 2000, 55(6): 719~728.
- [36] 杨冬辉. 城市空间扩展与城市环境约束机制的建立. *规划师*, 2001, 17(4): 82~86.
- [45] 刘邵权, 陈国阶, 陈治谏. 三峡库区山地生态系统预警. *山地学报*, 2002, 20(3): 302~306.
- [46] 陈治谏, 陈国阶. 环境影响评价的预警系统研究. *环境科学*, 1992, 13(4): 20~23.
- [47] 刘邵权, 陈国阶, 陈治谏. 农村村落生态环境预警——以万州区茨竹乡茨竹五组为例. *生态学报*, 2001, 21(2): 295~301.
- [48] 许学工. 黄河三角洲生态环境的评估和预警研究. *生态学报*, 1996, 16(5): 461~468.