

张青萍, 杨 柳. 基于最小累计阻力模型的西南城市景观连通性研究[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(6): 438–442.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.06.129

基于最小累计阻力模型的西南城市景观连通性研究

张青萍¹, 杨 柳²

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学公共管理学院/贵州大学中国西部发展能力研究中心, 贵州贵阳 550025)

摘要:以贵州省贵阳市为研究对象,从结构连通性、绿当量强度、功能连通性三方面入手,采用绿当量计算阻力系数,并利用阻力因子的分级对 MCR 模型进行修正,模拟生态景观连通性优化廊道,对景观格局进行优化研究。结果显示,2001—2013 年,研究区景观破碎度、人类干扰程度大幅增大,生物多样性有所提高,景观连通性、团聚性减弱,结构连通性总体呈下降趋势,威胁区域景观生态功能的流通;中心城区绿当量强度明显下降,3 县 1 市地区的绿当量强度增加;阻力值分布呈 4 个阻力高值区,阻碍了生态流的流通,可构建 2 条优化主廊道及 2 条优化次廊道作为物种迁移和生态流空间扩散的通道。

关键词:景观;连通性;最小阻力模型;生态;绿当量;系统服务价值;西南山区;贵阳

中图分类号: F301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)06-0438-04

西南山区是我国经济比较落后的地区,也是我国生态环境十分脆弱的地区。西南山区拥有大面积的喀斯特碳酸盐地貌,是典型的生态环境脆弱区域,加之城市化进程中人为干扰城市景观格局,西南山区城市生态环境敏感度及破碎程度不断提高,严重威胁城市的生态建设。

景观连通性是指景观促进或阻碍生态流在景观格局间运动的程度^[1],实际上是反映生态流、物质能量流在景观中扩散和流动的能力,包括结构连通性(structural connectivity)和功能连通性(functional connectivity)。早期的景观连通性研究侧重于对景观结构进行分析,而景观功能连通性的研究几乎没有涉及,随着对景观连通性研究的深入,许多学者利用多种模型对功能连通性进行相关研究。目前,基于模型的景观连通性研究均是利用生境斑块分布和物种运动等信息,在景观尺度上模拟出景观连通性,如扩散成功(dispersal success)、搜索时间(search time)、离散随机轨道(discrete random walks)和细胞迁入(cell migration)等模型^[2],但是,这些模型对运算和数据的要求非常苛刻,操作复杂,不适用于宏观尺度的区域土地利用结构调整、生态保护区规划等景观连通性研究^[3]。近年来,一些学者采用最小累积阻力模型(minimum cumulative resistance, MCR)模拟区域景观中的连通性^[4-5],具有数据要求简单、运算快捷、模拟结果直观形象等优点,是目前景观大尺度水平上评价景观连通性较好的工具之一。本研究利用绿当量及源的分级,对 MCR 模型进行修正,从景观结

构连通性、景观绿当量强度、景观功能连通性三方面对研究区景观的连通性进行模拟,以期对研究区生态格局进行优化。

1 研究区概况及数据来源

1.1 研究区概况

贵阳市作为贵州省的省会城市,是贵州经济、文化和交通中心,位于贵州省中部,106°07′~107°17′ E, 26°11′~26°55′ N。贵阳市呈西南高、东北低的地势,属于典型的西南喀斯特山地,境内分布有大量的山地及丘陵,90%左右为山地、丘陵、峡谷等,区域地貌破碎;最高峰海拔 1 659 m,最低处海拔 880 m,平均海拔 1 100 m 左右,海拔相对高差大。贵阳市受典型西南山区地貌的影响,生态环境脆弱,景观连通性比较弱。

1.2 数据来源

利用 2013 年 6 月的 Landsat 遥感影像为基础数据(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站 <http://www.gscloud.cn>,分辨率为 30 m×30 m),结合贵阳市西南山区现状、研究需要及土地利用现状分类标准对影像进行分类,解译得到耕地、林地、建设用地、水体和草地 5 个地类,并形成土地利用分类图作为研究底图(图 1)。

2 基于 MCR 模型的景观连通性计算

2.1 最小累计阻力模型概述及其应用于景观连通性的原理

MCR 模型是指模拟生态流从“源”经过具有不同生态服务功能的景观过程中所需要克服阻力的模型,最早由 Knaap-en 等^[6]提出,其关键因素为源、景观阻力系数及运动距离^[7],其一般表达式^[8]为:

$$MCR = \int_{\min} \sum (D_{ij} \times R_j)。$$

式中:MCR 为最小累积阻力值; D_{ij} 表示物质流从源到景观栅格单元的运动距离; R_j 表示景观单元 i 对物质流运动的阻力系数; f 表示最小累积阻力与距离、景观阻力因子呈正相关; i 表示景观单元的个数, j 表示阻力面栅格个数。MCR 模型最

收稿日期:2015-12-21

基金项目:国家自然科学基金(编号:41401400);贵州大学文科重大科研项目(编号:GDZT201305号);贵州省科学技术基金(编号:黔科合 J 字[2012]2170 号);贵州大学引进人才科研基金[编号:贵大人基合字(2010)006 号];贵州省教育厅高等学校人文社会科学研究基地项目。

作者简介:张青萍(1990—),女,硕士研究生,主要从事土地资源利用与保护研究。E-mail:651418954@qq.com。

通信作者:杨 柳,博士,副教授,主要从事土地利用研究与数据挖掘研究。E-mail:yang_w hu.edu@163.com。

早被应用于生物迁移研究,生物体对景观结构的感知和反应会改变其运动方向及快慢程度,这种感知和反应即为旅行费用(travel cost),用于描述景观阻碍或促进物质流在生境斑块

间的运动过程,与景观功能连通性原理非常相似^[9],可把景观功能连通性换算为物质流在景观中扩散所需的阻力。因此,近年来,MCR 模型因其简便形象常被用于景观连通性研究。

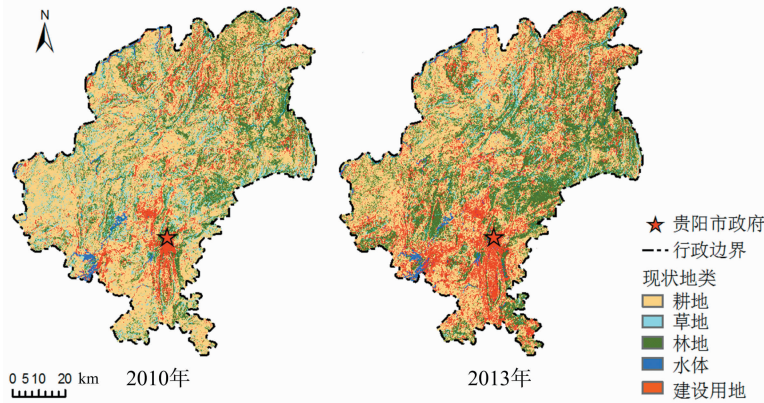


图1 贵阳市2001、2013年土地利用分类

2.2 源地识别

“源”是物质流扩散和维持的原点,具有内部同质性和向四周扩张或集聚的能力^[10]。本试验以典型、具有代表性的生态用地,即具有良好生态服务价值的生态区域如自然保护区、森林公园、旅游景点、水源地、公园、文化保护区等作为源,对城市生态用地景观的连通性变化进行研究。

2.3 阻力系数设定

阻力系数设定是 MCR 模型的关键,而目前相关研究忽略了生态流在景观格局流动过程中存在绝对的运动约束。建设用地具有地面硬质化、土壤养分退化等特征而几乎不可能再被重新作为植物生存的载体,这些建设用地区域构成生态流流动的刚性约束,生态流无法流通,只能跨越,与距离无关,建设用地将对生态流流通的模拟结果产生重要影响。阻力系数设定分为生态流通刚性阻力及一般阻力系数,本试验将研究区建设用地形成生态流通刚性阻力分布图,地类要素形成生态流通一般阻力图,最终形成生态流通综合阻力图,并对 MCR 模型进行修正。

2.3.1 生态流通刚性阻力设定 根据研究目的及研究区地类分布情况,将建设用地确定为刚性阻力因子,对生态流流动构成刚性约束,阻力系数无穷大,实际过程中将其阻力值赋为 999^[11]。

2.3.2 生态流通一般阻力系数设定 从生态角度出发研究城市景观连通性,生态流在景观格局中运动的最大阻碍是地类。目前,一般阻力系数设定没有统一标准。绿当量是度量生态系统健康及连续程度的一个重要指标,基于绿当量对地类生态用地功能的精确表达,本研究利用地类的平均绿当量来设定生态流通的阻力系数。根据前人研究成果^[12-17],并结合研究区的地理特征计算研究区生态服务总分值,测算研究区地类的平均绿当量。研究区生态服务总分值计算公式为:

$$P = \sum_{i=1}^{19} A_i$$

式中:P 为生态服务总分值;A 为指标评价分值;i 为指标个数。在全年满种的前提下,设定林地绿当量为 1.00,则各地类平均绿当量计算公式为: $L_i = A_i/A_{林}$ 。

式中: L_i 为各地类平均生态绿当量; A_i 为各地类生态系统服

务总价值; $A_{林}$ 为林地生态系统服务总价值。

经统计,贵阳市自然林地、人工林地、园地生态服务总分平均值为 154.24;相同面积及全年满种情况下,水田、旱地等耕地生态服务总分平均值为 120.56,草地生态服务总分为 121.84,水体生态服务总分为 142.56。由于我国各地区分属不同气候带,气候条件不同,作物熟制不同,需要对满种前提下的生态绿当量进行修正,一般是将总分值乘以生长期系数。贵阳市属于西南亚热带地区,且位于秦淮线-北回归线之间,作物 1 年 2 熟,故生长期系数取 0.67^[18]。经修正,林地、草地(暂以熟制讨论)、耕地、水体(暂以绿当量计算)平均生态绿当量分别为 1.00、0.53、0.52、0.62,以每种生态功能要素平均绿当量占总平均绿当量比例的倒数作为阻力因子的阻力系数,则贵阳市林地、草地、耕地、水体的阻力系数分别为 27、50、53、44(表 1)。

表 1 贵阳市各类生态用地的阻力系数

用地类型	生态用地平均绿当量	阻力系数
林地	1.00	27
草地	0.53	50
耕地	0.52	53
水体	0.62	44

3 结果与分析

3.1 研究区景观结构连通性的演变

景观结构连通性可以通过连通性指数来衡量,包括破碎度、集聚度、蔓延度、分离度、连通度等景观格局指数^[19],通过景观格局软件 Fragstats 可计算得到。利用 Fragstats 软件,从地类级别(class metrics)选取斑块个数(NP)、斑块密度(PD)、最大斑块指数(LPI),从景观级别(landscape metrics)选取斑块凝聚度(COHESION)、分离度(SPLIT)、香农多样性指数(SHDI)、聚合度(AI)、蔓延度(CONTAG)共 8 个指数对景观结构连通性进行描述。由表 2 可见,2001—2013 年,研究区斑块个数及斑块密度分别由 145 382 个、18.35 个/km² 上升到 262 659 个、33.16 个/km²,这说明研究区景观破碎度因建设用地的增加而大幅增大;最大斑块指数由 33.43% 上升到 64.48%,这说明研究区人类干扰程度不断增大,人为规划设

计活动对研究区景观的干扰和影响痕迹明显;斑块凝聚度及蔓延度分别从 99.78%、45.44% 下降到 99.46%、41.96%,这说明研究区景观连通性呈下降趋势,生态用地斑块功能和廊道功能均有一定程度减弱;香农多样性指数由 1.10 上升到 1.19,这说明研究区林地、草地等生态用地面积大幅增加,生物多样性也随之升高;分离度增大而聚合度下降,这说明研究区景观的团聚性减弱。从 2001—2013 年,研究区景观结构的连通性总体呈下降趋势,人类干扰、不透水面的侵蚀覆盖等都威胁区域景观生态功能的流动。

3.2 研究区景观绿当量强度的演变

设 X_i 为研究区实际林地绿当量, x 为研究区实际绿当量, S_i 为 i 类用地面积, g_i 为绿当量, i 代表用地类型 ($i=1,2,$

3,4,⋯),根据最佳绿地覆盖率计算得到城市林地面积为 S_1 ,城市实际林地面积为 S_s ,得到模型为: $S_1 = M_z \times F_h$ (式中: F_h 为合理的绿地覆盖率, M_z 为城市总面积),对应的绿当量为 $X=1$;城市实际林地绿当量为: $X_1 = S_1/S_1 \times 100\%$;城市总绿当量为: $x = X_1 + \sum_{i=1}^3 \left[\frac{S_i \times g_i}{S_1} \times 100\% \right]$ 。合理绿地覆盖率 F_h 计算参照倪琳等的方法^[20],计算公式为: $F_h = (M_z - M_j - M_s - M_g - M_n)/M_z$,式中: M_j 为区域建设用地面积, M_s 为区域水体面积, M_g 为区域耕地面积, M_n 为难利用地。由表 3 可见,2001—2013 年,贵阳市生态用地不断增加,其生态绿当量及林地绿当量有所增加,而草地及耕地绿当量呈下降趋势。

表 2 研究区 2001、2013 年的景观结构连通性指数

年份	斑块个数 (个)	斑块密度 (个/km ²)	最大斑块指数 (%)	斑块凝聚度 (%)	分离度 (%)	香农多样性指数	聚合度 (%)	蔓延度 (%)
2001	145 382	18.35	33.43	99.78	3.90	1.10	80.17	45.44
2013	262 659	33.16	64.48	99.46	13.47	1.19	79.46	41.96

表 3 2001 年、2013 年研究区土地利用现状

年份	面积(km ²)						生态绿当量	实际地类绿当量		
	总面积	林地	草地	耕地	水体	建设用地		林地	草地	耕地
2001	7 922	1 484	749	4 925	110	654	1.197	0.400	0.107	0.690
2013	7 922	1 999	376	4 181	127	1 238	1.205	0.551	0.055	0.599

在 ArcGIS 中,用每种景观绿当量值占区域总值的比例作为景观服务功能强度,将 2001 年、2013 年 50 m×50 m 栅格图按绿当量结果进行重新分类,对绿当量进行空间化。由图 2 可见,2001—2013 年,南明区、云岩区、观山湖区、白云区、乌当区、花溪区等中心城区的绿当量由于建设用地扩展,其强度呈明显下降趋势,市中心城区呈现大面积的绿当量低值区,其景观服务功能偏低;息烽县、修文县、开阳县、清镇市这处于城市边缘的 3 县 1 市,其绿当量强度却因生态用地面积的增加而增加。

3.3 景观功能连通性演变及优化

3.3.1 最小累计阻力值的计算 将提取的生态源地矢量图层和生态流通综合阻力栅格图层导入 ArcGIS 下的 cost distance 模块,计算出研究区所有源地到每个栅格的最小累积阻力值,利用最小累积阻力模型模拟研究区生态用地景观的连通性,阻力值大的栅格表示景观连通性弱,反之则景观连通性强。由图 3 可见,2001 年、2013 年,阻力值分布呈明显的 4 个阻力高值区,且这 4 个区域阻力值集中分布;中心城区的高阻力区主要集中在市中心的南明区、花溪区沿线,3 县 1 市的高阻力区也集中分布在建设用地相对集中的城中心;整个研究区高阻力值基本沿建设用地分布而展开,建设用地密度越大,基础设施建设越完善,地面基本被不透水面覆盖,城市绿地所占比例越小,说明此区域景观的连通性越弱,需要加强生态建设;中心城区低阻力区主要分布在乌当区及花溪区大部分地区,是贵阳市城区水库、湿地、公园、风景旅游区等生态用地最为集中且面积最大的区域,形成了贵阳市城区的生态保护屏障,对贵阳市城区气候、生态环境起调节与保护作用,3 县 1 市的低阻力区集中分布在郊区、农村及风景区等生态环境优良的区域,这些区域景观连通性强,需要保持并进一步加强保

护。2001 年到 2013 年,由于建设用地的不断扩展,生态用地被侵蚀,城市中心城区的阻力值明显呈增加趋势,即景观连通性强度下降。2002 年,贵州省全面推行退耕还林政策,促使了 3 县 1 市地区林地及草地面积的增加,其阻力值呈下降趋势,即景观连通性强度增加。

3.3.2 景观连通性优化阈值的设定 利用 2013 年阻力值分布图像元(阻力值)大小与栅格数目的关系,采用自然断点法,取曲线拐点处(A 点)作为景观连通性优化阈值设定的分界点^[21],则阻力值大于 1 023 726 的区域为生态阻力高值区(图 4)。

3.3.3 连通性优化生态廊道的构建 在 ArcGIS 中,利用景观连通性优化阈值对 2013 年阻力分布图进行重新分类,得到 4 个明显的生态阻力高值区,该区域景观连通性较弱,利用生态廊道可对其景观连通性进行提升,将 4 个主要生态阻力高值区的中心进行连接,构建西—东北、南—北方向的 2 条优化主廊道;为加强廊道建设,可将 4 个主要生态高值区与其周围的次要生态高值区中心连接起来,构建东—西南、南—东北方向的 2 条优化次廊道,作为物种迁移和生态流、物质流空间扩散的廊道(图 5)。在城市规划和生态建设中,要特别注意这 4 条生态廊道的建设,以提高研究区的绿当量,形成研究区良好的生态系统,并维持城市生态健康及生物多样性。

4 结论

以贵阳市为例,采用修正的 MCR 模型对研究区景观连通性进行模拟,并利用 ArcGIS 等可视化软件对研究区的景观连通性进行研究,结果表明,2001—2013 年,研究区景观破碎及人类干扰程度不断增大,人为规划设计活动对研究区景观的干扰和影响痕迹明显,生物多样性有所提高,景观连通性及景

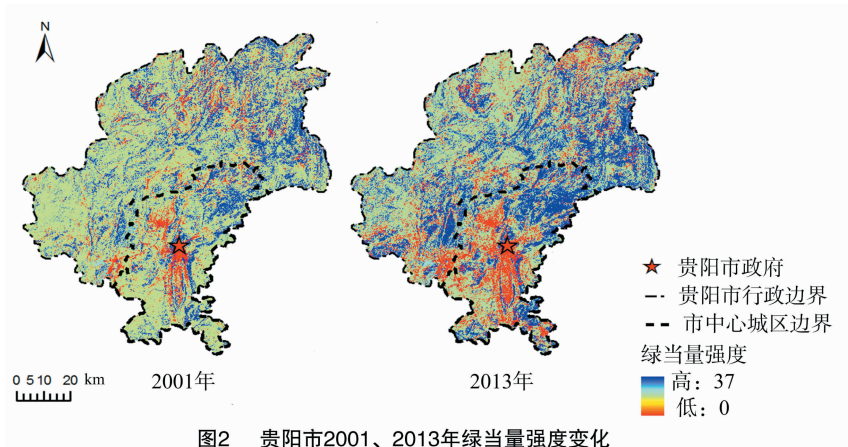


图2 贵阳市2001、2013年绿当量强度变化

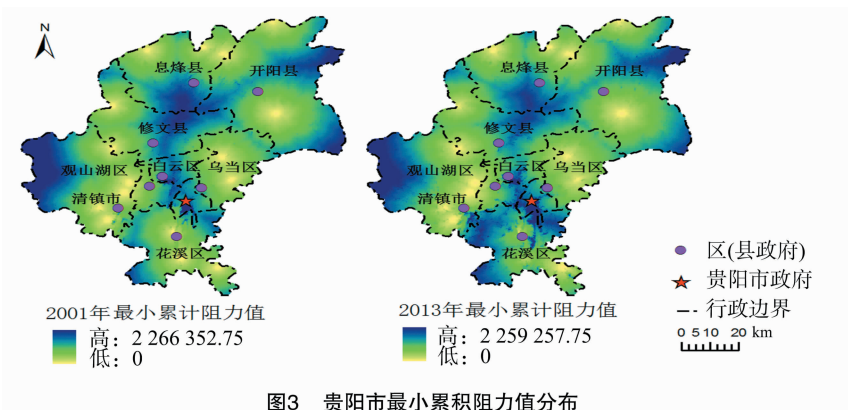


图3 贵阳市最小累积阻力值分布

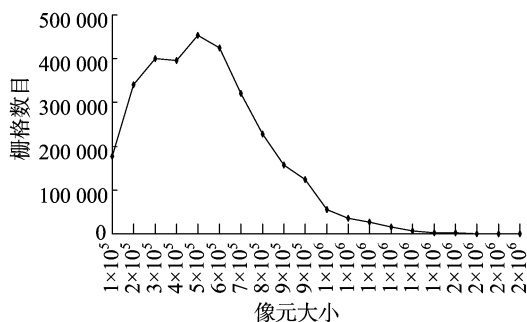


图4 贵阳市2013年像元值与栅格数目的关系

设用地的不断扩展并侵蚀生态用地,城市中心城区的阻力值呈增加趋势,景观连通性强度下降,3 县 1 市由于林地及草地面积的增加,其阻力值呈下降趋势,景观连通性强度增加;高阻力区主要集中在市中心的南明区、花溪区沿线及 3 县 1 市的城区,高阻力值分布基本沿建设用地的分布而展开,形成 4 个明显的阻力高值区,该区域景观连通性非常弱,需对其进行优化。根据阻力高值区的分布情况,构建了 2 条景观连通性优化主廊道与 2 条优化次廊道,为生态流、物质流的流通疏通了道路。

参考文献:

- [1] 俞孔坚,黄刚,李迪华,等. 景观网络的构建与组织——石花洞风景名胜景区景观生态规划探讨[J]. 城市规划学刊,2005,14(3): 76-81.
- [2] 俞孔坚,李迪华,段铁武. 生物多样性保护的景观规划途径[J]. 生物多样性,1998,6(3):205-212.
- [3] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. 生态学报,1999,19(1):8-15.
- [4] 李谦,戴靓,朱青,等. 基于最小阻力模型的土地整治中生态连通性变化及其优化研究[J]. 地理科学,2014,34(6):733-739.
- [5] 乔富珍,郑忠明,李加林,等. 基于最小累积阻力模型的围垦新区景观格局优化——以连云港连云新城为例[J]. 宁波大学学报:理工版,2014,27(3):119-123.
- [6] Knaapen J P, Scheffer M, Harms B. Estimating habitat isolation in landscape planning[J]. Landscape and Urban Planning, 1992, 23(1):1-16.

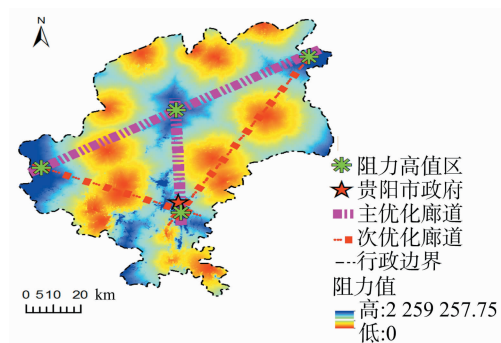


图5 贵阳市 2013 年景观连通性优化廊道

观的团聚性减弱,研究区景观结构连通性总体呈下降趋势,不利于区域景观生态功能的流通;贵阳市中心城区绿当量由于建设用地的扩展,其强度呈明显下降趋势,处于城市边缘的 3 县 1 市其绿当量强度却因生态用地面积增加而增加;由于建

社会石,秦旭升,陈智文. 中国农业气象灾害定量评估[J]. 江苏农业科学,2016,44(6):442-446.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.06.130

中国农业气象灾害定量评估

社会石,秦旭升,陈智文

(吉林师范大学生态环境研究所,吉林四平 136000)

摘要:利用1949—2012年中国农业气象灾害资料,采用数值分析方法,计算干旱、洪涝、风雹和低温冷害等气象灾害的成灾率,并对各类气象灾害分级赋值;采用灰色关联分析法,计算各类气象灾害与总灾害的关联度,进而确定其对农业生产的影响权重和影响程度,并分析其时空演变特征。结果表明,64年来,中国农业气象灾害平均成灾率、各类灾害平均成灾率均呈增加趋势,以干旱平均成灾率增长最快,达0.98%/10年;干旱占气象灾害影响权重最高,并主要分布在中国北方地区;农业气象灾害总体以Ⅲ级灾害为主;特别是近10年,V级灾害发生频率升高。研究结果为分析农业气象灾害时空演变、农业防灾减灾、粮食生产稳产提供科学参考。

关键词:农业气象灾害;定量评估;灰色关联分析

中图分类号:S42 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2016)06-0442-05

全球气候变化是国际科学研究的焦点问题,对各国的可持续发展具有重要影响^[1-2]。气候变化对农业的影响具有多尺度、多层次、正负影响并存的特征^[3]。气候变暖使世界部分地区的粮食生产得到了发展,但与此同时,极端天气又对农业产生损失^[4-5],造成农业结构、粮食产量的大幅度变化^[6-10]。中国是农业国家,地处东亚季风区,气象条件年际波动较大,农业气象灾害多发,气象灾害发生频率约占全部自

然灾害的70%^[11-12],年均受灾面积约占作物播种面积的31%。中国农业气象灾害具有明显的地域性和季节性,50年来,华北和东北地区的旱灾、东南和长江中下游地区的洪涝呈增加趋势^[1]。作物因气候变暖而发育期提前、抗寒性减弱,致使中国南方冬季冰冻和春季霜冻的危害放大,农业生产在一定程度上受到威胁^[4]。定量评估农业气象灾害特征及其时空变异,对我国粮食安全及社会可持续发展具有重要意义。

随着学科的发展及相互交叉,国内学者从气象灾害对农业生产的影响^[6]、气象灾害与农业生态^[4]、气象灾害演变^[13]、气象灾害预警与防御^[14]等诸多方面进行了研究,但这些研究多限于省级行政单位范围内,缺少宏观、长时间序列评估,有关农业气象灾害定量评估的报道较少。本研究选取4种对农业生产影响较大的气象灾害,定量评估其发生特点,探讨变化规律,以期对农业可持续发展、农业防灾减灾提供科学参考。

收稿日期:2015-05-03

基金项目:国家自然科学基金(编号:41401002);吉林省社会科学基金(编号:2014B127);吉林师范大学研究生科研创新计划(编号:2013006)。

作者简介:社会石(1983—),男,吉林伊通人,博士,讲师,主要从事农业遥感研究。E-mail:duhs@163.com。

通信作者:陈智文,教授,主要从事生态农业与新型肥料研究。Tel:(0434)3291890;E-mail:sdczw4489@126.com。

[7]李晖,易娜,姚文璟,等. 基于景观安全格局的香格里拉县生态用地规划[J]. 生态学报,2011,31(20):5928-5936.

[8]李平星,陈东,樊杰. 基于最小费用距离模型的生态可占用性分析——以广西西江经济带为例[J]. 自然资源学报,2011,26(2):227-236.

[9]张景华,吴志峰,吕志强,等. 基于景观连接度的斑块分级的尺度效应[J]. 生态环境,2008,17(5):1926-1930.

[10]俞孔坚,游鸿,许立言,等. 北京市住宅用地开发压力与城市扩张前景——基于阻力面的分析[J]. 地理研究,2012,31(7):1173-1184.

[11]叶玉瑶,苏泳娴,张虹鸥,等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报,2014,69(4):485-496.

[12]胡小飞,傅春. 南昌城市绿地系统生态调节服务功能价值动态分析[J]. 江西农业大学学报,2014,36(1):230-237.

[13]肖强. 基于生态绿当量的重庆市永川区土地利用结构优化研究[J]. 西南师范大学学报:自然科学版,2013,38(8):46-49.

[14]Jim C Y. Managing urban trees and their soil envelopes in a contiguously developed city environment[J]. Environmental Management,

2001,28(6):819-832.

[15]刘艳芳,明冬萍,杨建宇. 基于生态绿当量的土地利用结构优化[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2002,27(5):493-498,515.

[16]Forman R T, Godron M. Landscape ecology [M]. Cambridge: Cambridge University Press,1986.

[17]毛文永. 生态环境影响评价概论[M]. 北京:中国环境科学出版社,1998.

[18]Hardin P J, Jensen R R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: a terre haute case study [J]. Urban Forestry and Urban Greening,2007,6(2):63-72.

[19]刘世梁,杨珏婕,安晨,等. 基于景观连接度的土地整理生态效应评价[J]. 生态学杂志,2012,31(3):689-695.

[20]倪琳,周勇,刘义,等. 基于生态绿当量的土地利用结构优化研究——以湖北省潜江市为例[J]. 资源与产业,2008,10(4):50-53.

[21]钟式玉,吴箐,李宇,等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构——以广州市新塘镇为例[J]. 应用生态学报,2012,23(11):3173-3179.