

王让会¹ 张卫东² 周丽敏¹ 刘春伟¹ 彭擎¹ 田畅¹ 丁立国¹

气候变化及景观格局与生态安全的耦合关系

摘要

生态安全的本质集中在生态风险与生态脆弱性等方面,生态安全研究是低碳绿色发展的热点方向,对于优化景观生态空间结构与维护生态可持续性具有重要理论价值与现实意义.应用地理学、生态学以及遥感、GIS等多学科交叉与融合的原理与方法,研究气候变化与景观格局的特征与规律、气候变化与生态过程的耦合关系、景观格局与功能特征;分析景观格局、气候要素与生态系统中土壤、水文过程及植被过程的关系,气候变化对碳储量、NPP以及生态系统服务功能的影响,揭示气候变化对生态过程的影响规律.综合分析表明,气候要素影响生态安全的表现特征及其变化,景观格局是制约区域生态安全的基础,气候变化与景观格局对生态安全机制的影响具有复杂性.

关键词

景观格局;气候变化;生态安全;耦合关系;生态系统;碳循环

中图分类号 P40;Q14

文献标志码 A

收稿日期 2022-01-02

资助项目 山水林田湖草沙系统治理项目(AKSTLMHXM2021-05);国家重点研发计划(2019YFC0507403)

作者简介

王让会,男,博士,教授,主要从事景观生态与环境演变、遥感与GIS应用等研究.rhwang@nuist.edu.cn

1 南京信息工程大学 应用气象学院,南京,210044

2 生态环境部 南京环境科学研究所,南京,210042

0 引言

气候变化及人类活动极大地干扰了自然生态系统的演替过程,也对人工生态系统的稳定性产生了明显影响,直接或间接地影响着区域生态安全.目前,不同类型的生态系统所面临的一系列重大问题,很大程度上与气候变暖以及不合理的景观布局,造成各要素之间的不协调,导致生态安全受损密切相关.

生态系统是生物与环境要素组成的复杂系统,绿色景观空间及碳循环在减缓气候变化中具有重要作用^[1-2],评估植被变化是探索气候变化对生态安全影响的重要切入点^[3].人们对自然生态系统在景观格局与气候变化背景下的变化机制已开展了一系列研究,但要科学认识及评价生态安全受景观格局与气候变化影响的机制,无疑因人为因素的存在,增加了诸多难度.针对快速城市化背景下,景观格局与气候变化所产生的资源配置、环境保护、生态人居、低碳发展等重大问题,应用多学科的原理与方法,借助信息化技术,综合考虑多种产业、多种过程之间的内在联系,改善生态系统功能,保障生态安全,就显得十分紧迫.

目前,探索气候变化与景观格局背景下生态系统中物质循环、能量流动及信息传递的特征,估算森林、草地、农田、湿地、城镇生态子系统的生产力、碳储量或者生态系统服务价值(ESV),既是地理科学、生态科学、环境科学、城市科学、管理科学与信息技术关注的重要方向,又是应对气候变化与碳减排进程中的关键问题,对该问题的探索可为推动生态安全问题的深入研究以及低碳绿色高质量发展,提供思路与模式.

1 生态安全的内涵特征及其研究热点

1.1 生态安全主要内涵

生态安全是国家安全的基石,随着地球资源环境问题的日益严峻,人们愈加关注生态安全问题.虽然关于生态安全的概念及其内涵还没有统一的界定,但自20世纪70年代以来,人们逐渐地形成了对生态安全的初步认识.一般而言,生态安全是指生态系统的健康和完整状况,是人类在生产、生活和健康等方面不受生态破坏与环境污染等影响的保障程度,包括水体与生物安全、空气质量与绿色环境等基本要素,形成了水、土、生物为核心的不同方面的内涵特征.生态安全

的本质主要体现在生态风险与生态脆弱性等方面.健康的生态系统是稳定的和可持续的开放系统,并能够维持它的组织结构以及保持对胁迫的忍耐性与恢复力.生态安全从空间尺度大小角度可分成全球生态系统安全、区域生态系统安全和微观生态系统安全等若干层次.生态安全具有整体性、不可逆性、长期性的特点,而生态安全的复杂性及学科交叉性,使其内涵更加丰富多样.在基于结构、功能与动态,尺度、过程与格局的景观生态学理念背景下,从生态安全相关问题的耦合关系及其机理方面展开研究,对于科学认识与评估生态安全状况,解析特定背景下生态安全程度具有重要理论价值.

不同自然地理背景、生态环境状况与社会经济发展水平下,特定生态系统具有复杂多样的生态安全特征.生态安全具有一定的地域特征与动态变化特征,反映了人类生存环境或人类生态条件的一种状态,又呈现出相对性特征.通过大量研究分析,人们更多地从生态安全理论等方面凝练出了生态安全的一系列特征与规律,并探索了若干生态安全研究的思路与理念^[4-5].生态伦理和生态文明的观点是生态安全的核心,人与自然协调发展的理念是生态安全的本质,资源承载力是生态容量与安全阈值研究的基础,环境容量是衡量生态系统稳定性的重要参数,生物多样性的丰富程度与物质转换程度是生态安全的重要指征,能量转换程度及效率是衡量生态安全的辅助因素,信息传递的方式与效率是评价生态系统安全的重要依据,生态系统结构复杂程度与运行状况是生态安全程度的重要指标,生态系统的功能发挥程度是界定生态系统安全程度的重要标准,社会经济状况是评价生态系统安全的重要背景条件,生态系统的管理状况和水平是确定生态安全的人为因子,数理生态及模型模拟方法是定量研究生态安全的方法论.基于上述理论与方法,在分析特定生态系统的安全特征时进一步具体化,必将帮助人们深刻地了解研究对象的生态风险与脆弱性等问题,综合性地把握生态安全特征.

1.2 生态安全研究的重要问题

在不同的生态安全研究领域,有一系列问题需要研究与探索.近年来,学者们对于生态安全的研究重点逐渐地转向了区域生态安全、生态安全评价和模型方法以及生态安全监测与预警等方面^[6],同时,关于不同生态安全的驱动要素、变化机理、调控机制与管理模式研究成为研究的重大科学问题,也成为

构建山水林田湖草沙生命系统的重要理论支撑.围绕着主要陆地生态系统过程与服务、土地利用变化与生态安全、生态系统服务的竞争与权衡和流域生态补偿与生态安全等的关键科学问题的研究也备受关注^[7].而关于不同时空尺度的生态安全评估、基于生态过程的生态安全格局^[8]、以生态红线为基础的生态格局构建模式、生态安全评价的标准、生态安全状况与生态系统过程的耦合关系,以及未来气候变化情景下的生态系统演变规律与动态变化研究更是生态安全领域的热点及难点.

生态安全的驱动机制及其演变规律,受到多种要素的制约,单一学科的原理与方法难以解决其机理问题,揭示生态安全机制需要多学科的理论支撑.近年来,相关学者开展的基于分形理论的景观空间异质性研究、生态系统的能值特征与变化规律、基于信息图谱分析的 CO₂ 减排特征、土壤水碳耦合关系及景观地球化学特征、土地利用与覆盖变化(LUCC)对生态系统气象环境影响的数值研究、生态系统碳收支与影响因素研究、植被变化对气候变化的响应等,为认识生态安全动态变化及其机制提供了重要理念与方法,而认识生态过程与环境演变规律,需要在特定时空格局下,基于地理、生态、水文、气象等专业基础,借助景观异质性原理、地理要素耦合原理、信息图谱技术、模型模拟技术,把多元信息融合起来,综合性地剖析生态系统的安全机制.

生态安全的动态变化至关重要^[9].生态安全可以通过时间点和时间段两个时间尺度进行指标分析,从而快速认识评价对象的现状和特征,并总结出其动态变化规律^[10].随着景观生态学理论和3S技术的拓展,生态安全评价方法也得到了不断的发展.生态安全研究与评价方法可以归纳为数学模型法、生态模型法、景观模型法和数字地面模型法等,不同方法研究生态安全的侧重点有所不同.近年来,模糊综合评价-层次分析法(AHP)-主成分分析(PCA)模型在生态安全风险评价中的应用备受关注.如何客观、定量地评价生态系统,使其能够持续健康发展是当前生态安全研究的热点和难点之一^[11].在相关原理指导下,压力-状态-响应模型(PSR)方法、灰度分析法、生态足迹法等在经济发达地区或城市群的生态安全研究中亦得到广泛应用^[12].为了更精确地刻画人类与环境相互作用的关系,欧洲环境署在PSR模型的基础上对模型框架进行了改进,增加了驱动力和影响两个维度^[13],力图提升生态安全评价的可靠

性程度.一般而言,运用多学科交叉与融合的原理与方法,结合多元数据建立不同生态系统安全评价的指标体系,设定生态指标安全阈值,构建生态安全指数(或生态安全度),制定生态安全评价标准,分析界定特定生态系统安全特征,并提出保障生态安全的模式与策略,是生态安全监测、评价及预警的关键与核心.目前,从景观尺度上构建景观生态安全指标体系,或者从生态系统尺度上构建多要素生态安全指标体系,借鉴“互联网+”理念与生态物联网理念与生态大数据信息获取手段,模拟生物地球化学循环为核心的生态过程及其变化规律,预测生态系统的未来变化,分析生态安全的状态水平,是生态安全理论与方法研究的重要趋势.

2 气候变化对生态安全的一般影响

气候变化可能是自然的内部进程或外部强迫,以及人为地持续对大气组成成分和土地利用的改变所导致的结果,并表现在生态安全特征方面.全面地研究气候变化背景下生态系统的相关特征,对于认识气候变化的规律,揭示生态安全机制,具有十分重要的作用.

气候变化影响人居环境及人类健康.气候变化影响主要包括气候变化后的资源生产、商品及服务市场的需求产生变化,使支持居住的经济条件受到影响.气候变化对能源输送系统、基础设施及旅游业等特定产业产生影响进而影响人居环境,可以从空间监测的角度认识生态系统的气候效应^[14].气候变化后因极端天气条件增加以及对人体健康的影响使得居住人口迁移.气候变化及人为活动造成的城市热岛(UHI)效应,对于城市环境质量、人体健康等造成诸多负面影响;UHI效应对人们生活能源消耗也具有重要影响^[15].应用GIS技术,集成疫情和其他环境数据库,有助于建立气候变化对人类健康影响评价体系,同时,大力开展气候风险评估和气候区域研究,建立相应的极端天气灾害及灾害应急机制,均对于科学认识及评价气候变化对生态安全的影响具有不可替代的作用.

气候变化影响社会经济发展.气候变化对能源生产和消费的各个环节都会产生影响,直接制约着社会经济发展,而能源政策对应对气候变化具有重要影响^[16].例如,低温、高温天气对采暖和空调能源需求的影响、降水变化对水利发电的影响、干旱与洪涝频率及强度改变对灌溉和排灌的能源需求的影响

响,以及极端天气事件造成的能源供应中断的影响等.另外,节能策略、温室气体减排方式以及目前关注的碳达峰与碳中和技术,对能源供应结构的影响具有复杂性,同时还具有一定的滞后性.交通运输与自然环境有着密切的关系,极易受到气候因子特别是极端天气的影响.

气候变化影响生态系统服务功能.在生态系统的生命支持系统中,净化空气、调节气候、减低噪声污染、降雨与径流的调节、废水处理和娱乐价值等ESV至关重要.气候变化影响生态系统的地表过程,直接影响净第一性生产力(NPP)与ESV^[17-18].

生态系统是由自然系统、经济系统和社会系统所组成的复合系统,它需要从其他系统中输入大量的物质和能量,同时又将大量废物排放到其他系统中去,这就必然会对其他系统的安全状况造成干扰.由于气候变化与生态系统要素相互作用的长期性与复杂性,生态安全时空变化研究仍是目前生态学及地理学等学科研究的重要方向.目前,无论是气候变化问题,还是气候变化对生态系统结构、功能、稳定性、ESV等影响研究,都离不开信息技术手段的应用.气候变化背景下的生态安全问题,作为当代人们关注的重要热点,将是一个长期的研究课题.在生态安全研究方法方面,定量化与综合性趋势集中体现在生态安全问题精确化与模拟化研究的不断深入.基于GIS技术的城市森林与热岛效应,减少UHI和温室气体排放以及城市形态与热岛强度沿城市发展梯度的关系^[19],是城市化背景下生态安全研究的重要议题.马世骏等^[20]提出了社会-经济-自然复合生态系统的概念、原理与特征;于贵瑞等^[21]研究了中国陆地生态系统空间化信息,基于GIS技术、数据库技术、数字模拟技术,构建了国家尺度各种气候要素的数值图像,为多学科研究提供了重要的基础数据和研发平台;王如松^[22]从高效和谐的角度分析了生态调控原则与方法.从20世纪90年代末期,地学信息图谱概念被提出以来,地学信息图谱的方法被逐渐地应用于生态安全评价领域.利用生态信息技术模拟分析生态系统及各生态要素的时间与空间特征,明确其结构、功能和影响范围,可为生态系统未来的气候适应及可持续发展确定一个科学合理的框架^[23],最终促进生态系统健康发展.

随着人们对气候变化模式研究的不断进展,特别是IPCC AR6(WG1)应用共享的社会经济路径(Shared Socioeconomic Pathways, SSP)等模式对气候

变化严峻性的预测,也为人们对未来不同情景下生态安全的演变规律研究敲响了警钟.景观格局、资源利用、能源消费、人居状况、产业布局,特别是人们的生活方式、日常行为所内涵的生态系统变化的驱动要素及作用方式,由此而伴随的物质循环、能量流动和信息传输方式,与周围环境系统紧密地联系在一起,这种复杂过程正是生态安全及其机制不确定性的重要诱因.如何科学反映气候变化背景下生态安全特征及提升生态环境质量,实现生态协调与环境优美的综合目标,成为探索生态安全机制的重要途径.

3 气候变化对生态安全的影响机制

3.1 气候要素对生态系统碳循环与生产力的影响

气候变化对生态系统的物质循环具有一定的影响,而碳循环及其相关问题是目前生态安全机制研究的热点.大量研究认为 CO₂ 是气候变暖的主要原因,大气 CO₂ 浓度升高主要是由于人类大量使用化石燃料将陆地及海洋碳库中大量碳转移到大气中造成的.研究还表明,森林生态系统固碳释氧是缓解气候变化与减少碳排放的重要途径.气候变化导致生态系统的组成和结构变化,直接影响生态系统的功能.

由于气候变化存在一系列不确定性,碳循环过程及其模型模拟的复杂性,相关气候要素对生态系统碳循环的影响存在一系列的复杂性.区域碳预算中城市生物碳通量不可忽视^[24],城市综合空间调整监控直接影响碳储量^[25],城市环境下植被信息的遥感方法对于地上碳储量的建模以及碳储量的变化至关重要^[26].利用 SLEUTH 模型和 InVEST 模型耦合模拟城市扩张对区域碳储量的影响^[27],探索城市化背景下的碳储量时空变化^[28],均对人为影响下的生态安全机制研究与综合效应分析具有重要价值.土壤呼吸是陆地生态系统碳循环的重要环节之一,土壤呼吸对温度升高的适应可以视为碳循环对全球变暖的负反馈效应,它在一定程度上可能缓和陆地生态系统对全球气候系统之间的耦合作用,并且导致土壤呼吸对全球温度升高响应的时空差异^[29].张文菊等^[30]以植物生理生态特性和有机碳循环的动力学原理为基础,利用室内模拟培养试验结果,率定温度、积水强度、冻融交替对湿地有机碳分解矿化的影响参数,建立典型湿地生态系统碳循环模拟模型.在生态系统中,特殊的生物与环境要素,使得生态系统

的碳储量、碳收支及碳循环等问题表现出独特性,也成为研究气候变化与生态系统过程及其安全特征的重要途径.

在气候要素对生态系统生产力研究方面,许多专家开展了具有创新性的研究工作.基于近 60 a 气候变化规律及其对常绿阔叶林 NPP 的影响,研究结果表明,年降雨量、月参考蒸散量年均值和年平均气温是影响 NPP 变化的主要因子^[31].模型模拟方法在研究气候变化过程及效应方面具有重要作用,基于生态过程的 Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA) 模型,利用遥感数据和同期的温度、降水、太阳辐射资料以及植被和土壤信息,对长江流域的植被 NPP 及其时空分布格局进行了分析^[32].通过构建各树种地理分布的生态气候信息库,应用 GIS 软件及森林生产力与气候环境变量的相关模型,采用全球大气环流平衡模式构想法,研究了气候变化对中国主要造林树种和森林生产力的影响规律^[33].上述研究对于探索生态系统相关子系统的生产力变化及其生态安全机制具有重要启示及借鉴价值.

3.2 景观格局与生态安全变化规律

景观格局指景观的组分构成及其空间分布、组合的特征,与生态系统的安全特征亦具有直接关系.对景观格局进行研究,有助于了解生态系统的稳定性以及预测未来发展趋势,为生态安全综合监测、评估及预警管理提供科学依据.

国内外对景观格局的研究主要表现在应用遥感信息技术、地理信息技术、物联网技术进行景观格局分类,利用景观指数分析景观要素的变化,运用模型模拟景观格局的动态变化以及人类对景观的影响等方面,而对于景观格局与生态安全关系研究还有待深化.目前,利用遥感信息,在 GIS 支持下,对生态系统进行景观分类,定量估算形状指数、斑块密度、聚集度、多样性指数等景观格局指数,获得对景观要素及类型的定量参量,并基于景观指数的生态学内涵,分析其时空特征及其变化规律,成为认识生态安全的重要出发点.LUCC 影响生态过程及其碳平衡^[34],基于生态过程的植被生长及 ESV 模拟^[35],把景观格局及生态过程有机地联系起来^[36].利用形状指数以及分维数和稳定性指数,对景观要素的稳定性分析可知,地形因子与人类活动是景观稳定性的主要影响因素,人类活动对生态安全具有至关重要的作用.随着景观地理学、地理信息学、生态规划学等学科的发展,人们已经不满足于利用景观指数来单纯

地刻画景观格局的数量变化,希望可以将景观指数融合到生态过程,以进一步探索景观尺度上生态安全特征及机制.特别是通过同一生态系统内要素的动态变化、不同生态系统之间的物质流动以及生物之间的相互作用等方面研究,拓展不同尺度背景下格局与过程的耦合关系,进而分析景观格局对生态安全的影响过程及其机制.

4 主要结论

生态安全在一定程度上可以说是人与自然统一体免受不利因素危害的存在状态及其保障条件^[37].目前提及的山水林田湖草沙生命系统,是地球系统的重要组成部分,也是人类社会发展的依托,维护并使得系统的脆弱性不断得到改善,是现阶段应对气候变化,优化景观格局,维护生态安全的历史性选择.如前所述,在全球变化及快速城市化背景下,资源、环境、生态、能源等问题备受关注. IPCC 研究报告强调人类必须通过共同努力,应对日益明显的气候变化所造成的负面效应.特定景观格局背景下,生态要素影响并制约着区域气候特征,特定区域气候不同程度地反馈于生态过程,产生不同的生态效应,这些问题的本质就是生态气象耦合关系问题,也是生态安全问题.该问题涉及地理空间分异规律、生态系统耦合关系规律、区域气候特征规律以及遥感信息与地理信息的交叉与融合,需要运用多学科的原理与方法,探求合理的解决方案.

4.1 气候变化与景观格局对生态安全的影响极其复杂

气候变化与景观格局无论是对生态系统结构、功能、稳定性,还是对碳循环、ESV 等,均具有多样化与复杂性的表现特征.科学评价这种影响的范围与程度,把握影响过程及特点,存在着一系列急需解决的难题.特定自然背景下的资源消耗、能源消费、人为活动都直接或间接地造成生态系统的变化.监测和分析气候变化背景下的这种变化,合理地规划生态系统结构,保障生态系统功能,探索减缓气候变化关键问题,对于维护区域生态安全具有不可替代的作用.基于气候变化与景观格局对生态安全影响的认识,运用多学科原理与方法,通过开展绿色植物固碳释氧的生物减排机制,气候变化背景下的清洁发展机制(CDM)等问题的研究,以利于增强应对气候变化的科学基础;同时,通过基于生态文明理念的应对气候变化策略,基于低碳规划的生态产业发展等

研究,制定与实施应对气候变化政策与法规,可望能够为生态系统适应气候变化的策略提供理论与技术支撑,并长久地维护生态安全.

4.2 气候要素影响生态安全的表现特征及其变化

大量的研究表明,自然因素和人为活动共同造成了生态系统的变化,并影响到生态系统的安全特征.要全面地了解气候变化对生态系统带来的环境效应,就必须开展气候变化的生态系统影响评估.气候要素对生态安全的影响不仅表现在对自然生物与环境要素的影响方面,还体现在对人类健康、社会经济发展和 ESV 等方面.生态安全的表现特征及其动态变化,受到温度、降水等气象要素的直接影响,也受到其长期变化所形成的区域气候特征的制约.生态安全在生态风险及脆弱性等方面所表现出的一系列特征,体现了其生物地球化学循环特征的变化过程,也是生态安全机制的主要体现.无论是水文要素、气象要素,都不同程度地影响着生态安全的状态.

4.3 景观格局是制约区域生态安全的重要基础

无论是景观结构、功能与动态,还是景观尺度、过程与格局,都与景观尺度上的生态安全密切相关,而把握景观格局则是认识生态安全的基础.基于生态景观格局,结合生态系统的相关要素及其时空变化特征,对于探索生态安全变化的驱动要素与变化规律具有基础性意义.人为活动造成的土地利用变化,直接引起生态景观格局的变化,而特定景观格局背景下,生态系统结构与功能的综合效应及变化规律等问题,成为生态安全研究的热点方向,并具有多元驱动要素及复杂作用过程的特点.

参考文献

References

- [1] Sharifi E, Larbi M, Omrany H, et al. Climate change adaptation and carbon emissions in green urban spaces: case study of Adelaide [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 254: 120035
- [2] Sun Y, Xie S, Zhao S Q. Valuing urban green spaces in mitigating climate change: a city wide estimate of aboveground carbon stored in urban green spaces of China's capital [J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(5): 1717-1732
- [3] Zaid S M, Perisamy E, Hussein H, et al. Vertical greenery system in urban tropical climate and its carbon sequestration potential: a review [J]. *Ecological Indicators*, 2018, 91: 57-70
- [4] 左成华,王让会,宁虎森,等.克拉玛依减排林区土地

- 开发的效应[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2011,3(6):544-549
ZUO Chenghua, WANG Ranghui, NING Husen, et al. Effect analysis of land development in carbon dioxide capture forest in Karamay [J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2011, 3(6): 544-549
- [5] 王让会,宁虎森,赵福生.二氧化碳减排林水土耦合关系及生态安全研究[M].北京:气象出版社,2021
WANG Ranghui, NING Husen, ZHAO Fusheng. Study on coupling relationship between soil and water and ecological security of carbon dioxide reduction forest [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2021
- [6] 左伟,王桥,王文杰,等.区域生态安全评价指标与标准研究[J].地理学与国土研究,2002,18(1):67-71
ZUO Wei, WANG Qiao, WANG Wenjie, et al. Study on regional ecological security assessment index and standard[J]. Geography and Territorial Research, 2002, 18(1): 67-71
- [7] 傅伯杰,吕一河,高光耀.中国主要陆地生态系统服务与生态安全研究的重要进展[J].自然杂志,2012,34(5):261-272
FU Bojie, LÜ Yihe, GAO Guangyao. Major research progresses on the ecosystem service and ecological safety of main terrestrial ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Nature, 2012, 34(5): 261-272
- [8] 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
YU Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. Acta Ecologica Sinica, 1999, 19(1): 8-15
- [9] 胡悦,马静,李雪燕,等.京津冀地区生态安全评价及障碍因子诊断[J].环境污染与防治,2021,43(2):206-210
HU Yue, MA Jing, LI Xueyan, et al. Ecological security evaluation and obstacle factor diagnosis for Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Environmental Pollution and Control, 2021, 43(2): 206-210
- [10] 王丽娜,李爽,吴迪,等.景感生态学:生态安全研究与实践的重要途径[J].生态学报,2020,40(22):8028-8033
WANG Lina, LI Shuang, WU Di, et al. Landsenses ecology: an important approach to research and practice of ecological security [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(22): 8028-8033
- [11] 周景博.城市生态安全核心问题与实现路径探析[J].环境保护,2018,46(增1):51-55
ZHOU Jingbo. Urban ecological security: core issues and realization paths [J]. Environmental Protection, 2018, 46 (sup1): 51-55
- [12] 杜婉莹,杨子生.我国城市土地生态安全研究进展[J].安徽农学通报,2020,26(6):105-109
DU Wanying, YANG Zisheng. Research progress on ecological security of urban land in China [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(6): 105-109
- [13] Sokolenko L F, Tiutiunyk I, Leus D V. Ecological and economic security assessment in the system of regional environmental management: a case study of Ukraine [J]. International Journal of Ecology and Development, 2017, 32(3): 27-35
- [14] Milesi C, Churkina G. Measuring and monitoring urban impacts on climate change from space [J]. Remote Sensing, 2020, 12(21): 3494
- [15] Roxon J, Ulm F J, Pellenq R J M. Urban heat island impact on state residential energy cost and CO₂ emissions in the United States [J]. Urban Climate, 2020, 31: 100546
- [16] Elliot T, Almenar J B, Rugani B. Impacts of policy on urban energy metabolism at tackling climate change: the case of Lisbon [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 276: 123510
- [17] Mngumi L E. Ecosystem services potential for climate change resilience in peri-urban areas in sub-Saharan Africa [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2020, 16(2): 187-198
- [18] Dobbs C, Hernández-Moreno Á, Reyes-Paecke S, et al. Exploring temporal dynamics of urban ecosystem services in Latin America: the case of Bogota (Colombia) and Santiago (Chile) [J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 1068-1080
- [19] Chen R N, You X Y. Reduction of urban heat island and associated greenhouse gas emissions [J]. Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, 2020, 25(4): 689-711
- [20] 马世骏,王如松.社会-经济-自然复合生态系统[J].生态学报,1984,4(1):15-21
MA Shijun, WANG Rusong. Socio-economic-natural complex ecosystem [J]. Acta Ecologica Sinica, 1984, 4(1): 15-21
- [21] 于贵瑞,何洪林,刘新安,等.中国陆地生态系统空间化信息研究图集:气象要素分卷[M].北京:气象出版社,2004
YU Guirui, HE Honglin, LIU Xin'an, et al. Atlas for spatialized information of terrestrial ecosystems in China: volume of meteorological elements [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2004
- [22] 王如松.高效和谐:城市生态调控原则与方法[M].长沙:湖南教育出版社,1988
- [23] Mauree D, Naboni E, Coccolo S, et al. A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 112: 733-746
- [24] Hardiman B S, Wang J A, Hutrya L R, et al. Accounting for urban biogenic fluxes in regional carbon budgets [J]. Science of the Total Environment, 2017, 592: 366-372
- [25] Li L, Song Y, Wei X H, et al. Exploring the impacts of urban growth on carbon storage under integrated spatial regulation: a case study of Wuhan, China [J]. Ecological Indicators, 2020, 111: 106064
- [26] Tigges J, Churkina G, Lakes T. Modeling above-ground carbon storage: a remote sensing approach to derive individual tree species information in urban settings [J]. Urban Ecosystems, 2017, 20(1): 97-111
- [27] Lü R F, Mi L N, Zhang J M, et al. Modeling the effects of urban expansion on regional carbon storage by coupling SLEUTH model and InVEST model [J]. Ecological Re-

- search,2019,34(3):380-393
- [28] Fu Q,Xu L L,Zheng H Y, et al.Spatiotemporal dynamics of carbon storage in response to urbanization:a case study in the Su-Xi-Chang region, China[J].Processes,2019,7(11):836
- [29] 俞元春.城市林业土壤质量特征与评价[M].北京:科学出版社,2020
YU Yuanchun.Properties and evaluation of urban forestry soil quality [M].Beijing:Science Press,2020
- [30] 张文菊,童成立,吴金水,等.典型湿地生态系统碳循环模拟与预测[J].环境科学,2007,28(9):1905-1911
ZHANG Wenju,TONG Chengli,WU Jinshui, et al.Simulating and predicting of carbon cycling in typical wetland ecosystems [J]. Environmental Science, 2007, 28 (9) : 1905-1911
- [31] 彭舜磊,由文辉,郑泽梅,等.近60年气候变化对天童地区常绿阔叶林净初级生产力的影响[J].生态学报,2011,30(3):502-507
PENG Shunlei, YOU Wenhui, ZHENG Zemei, et al. Effects of recent 60 years climate change on net primary productivity of evergreen broad-leaved forest in Tiantong region of Zhejiang province[J].Chinese Journal of Ecology,2011,30(3):502-507
- [32] 柯金虎,朴世龙,方精云.长江流域植被净第一性生产力及其时空格局研究[J].植物生态学报,2003,27(6):764-770
KE Jinhu, PIAO Shilong, FANG Jingyun. NPP and its spatio-temporal patterns in the Yangtze River watershed [J].Acta Phytocologica Sinica,2003,27(6):764-770
- [33] 徐德应,郭泉水,阎洪,等.气候变化对中国森林影响研究[M].北京:中国科技出版社,1997
XU Deying, GUO Quanshui, YAN Hong, et al.Impacts of climate change on forests in China [M].Beijing:China Science and Technology Press,1997
- [34] Wang C, Zhan J Y, Zhang F, et al. Analysis of urban carbon balance based on land use dynamics in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 281 : 125138
- [35] Rützer T, Rahman M A, Moser-Reischl A, et al. Process based simulation of tree growth and ecosystem services of urban trees under present and future climate conditions [J]. Science of the Total Environment, 2019, 676: 651-664
- [36] 孙然好,孙龙,苏旭坤,等.景观格局与生态过程的耦合研究:传承与创新[J].生态学报,2021,41(1):415-421
SUN Ranhao, SUN Long, SU Xukun, et al. Research on coupling of landscape pattern and ecological process: inheritance and innovation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1) : 415-421
- [37] 王亚飞,郭锐,樊杰.中国城市化、农业发展、生态安全和自然岸线格局的空间解析[J].中国科学院院刊,2016,31(1):59-69
WANG Yafei, GUO Rui, FAN Jie. Analysis on spatial development structure of pattern of urbanization, agricultural development, ecological security, and natural coastline in China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(1) : 59-69

Coupling relationship between climate change, landscape pattern and ecological security

WANG Ranghai¹ ZHANG Weidong² ZHOU Limin¹ LIU Chunwei¹
PENG Qing¹ TIAN Chang¹ DING Ligu¹

¹ School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Sciences & Technology, Nanjing 210044

² Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042

Abstract The essence of ecological security focuses on ecological risk and ecological vulnerability, and the study of ecological security is the hot points of low-carbon green development, which has important theoretical value and practical significance for optimizing landscape ecological spatial structure and maintaining ecological sustainability. Based on the interdisciplinary principles and methods involved in geography, ecology, remote sensing and GIS, this paper studies the characteristics and laws of climate change and landscape pattern, the coupling relationship between climate change and ecological process, landscape pattern and functional properties. The relationship between landscape pattern, climate factors and soil, hydrological processes and vegetation processes in the ecosystem is analyzed, and the effects of climate change on carbon storage, NPP and ecosystem services are studied to reveal the impact of climate change on ecological processes. The comprehensive analysis shows that climate factors affect the characteristics and changes of ecological security. Meanwhile, landscape pattern is the basis of restricting regional ecological security, and the effects of climate change and landscape pattern on ecological security mechanism are complex.

Key words landscape pattern; climate change; ecological security; coupling relation; ecosystem; carbon cycle