

DOI: 10.5846/stxb202103150689

张子墨, 姜虹, 徐子涵, 丹宇卓, 叶玉瑶, 彭建. 面向多重生态保护目标的广东省生态系统服务退化风险情景模拟. 生态学报, 2022, 42(3): 1180-1191.

Zhang Z M, Jiang H, Xu Z H, Dan Y Z, Ye Y Y, Peng J. Ecosystem service degradation risk scenario simulation for multiple ecological conservation objectives in Guangdong Province. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 1180-1191.

面向多重生态保护目标的广东省生态系统服务退化风险情景模拟

张子墨¹, 姜虹², 徐子涵¹, 丹宇卓², 叶玉瑶³, 彭建^{1,2,*}

1 北京大学城市与环境学院, 地表过程分析与模拟教育部重点实验室, 北京 100871

2 北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 深圳 518055

3 广东省科学院广州地理研究所广东省地理空间信息技术与应用公共实验室, 广州 510070

摘要: 稳定、协调、可持续的生态系统服务供给是维持区域自然生命系统、保障区域生态安全的基础。面临生态系统所受的人为与自然干扰, 有必要准确评估生态系统服务退化风险, 揭示区域生态安全和可持续性提升路径。现有研究多叠加所有生态系统服务以评估生态系统服务退化风险, 未能面向区域生态问题或生态需求对不同生态系统服务进行整合。研究提出面向多重生态保护目标的生态系统服务退化风险情景模拟框架, 考虑广东省生物多样性保育、水资源安全、自然灾害防范等生态保护目标, 选取代表性生态系统服务类型(生境维持、水源涵养、水质净化、土壤保持、洪水缓解、热带气旋缓解), 基于不同典型浓度路径情景评估 2018—2035 年生态系统服务退化风险。结果表明, 2018—2035 年广东省生态系统服务供给空间格局基本稳定, 尽管有所退化、空间异质性强。生态系统服务退化风险的情景模拟表明, 面向生物多样性保育目标的生态系统服务退化高风险区位于珠三角的深圳市、佛山市和江门市, 以及粤西和粤东地区的湛江市、茂名市和揭阳市; 面向水资源安全目标的生态系统服务退化高风险区位于珠三角的深圳市、中山市和江门市, 以及粤西与粤东地区的茂名市、揭阳市和江门市; 面向自然灾害防范目标的生态系统服务退化高风险区位于珠三角的深圳市与江门市、粤西与粤东地区的茂名市、湛江市和揭阳市, 是广东省生态系统服务退化风险防范的关键区域。面向多重生态保护目标, 广东省生态系统服务退化风险应对策略应重视城市生态系统生物多样性保育, 应加强对生态用地尤其是红树林的保护及恢复, 应对流域进行分级管控, 因地制宜开展面向多重生态保护目标的生态保护与修复工程, 应积极采取气候变化相关干预政策, 优选低资源消耗低生态影响的绿色可持续发展路径。

关键词: 生态系统服务退化风险; 情景模拟; 生物多样性保育; 水资源安全; 自然灾害防范

Ecosystem service degradation risk scenario simulation for multiple ecological conservation objectives in Guangdong Province

ZHANG Zimo¹, JIANG Hong², XU Zihan¹, DAN Yuzhuo², YE Yuyao³, PENG Jian^{1,2,*}

1 Laboratory for Earth Surface Processes, Ministry of Education, College of Urban and Environmental Science, Peking University, Beijing 100871, China

2 Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, School of Urban Planning and Design, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China

3 Guangdong Open Laboratory of Geospatial Information Technology and Application, Guangzhou Institute of Geography, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510070, China

Abstract: Stable, coordinated and sustainable supply of ecosystem services is the foundation for maintaining regional natural life systems and ensuring regional ecological security. Facing the human and natural disturbances to ecosystem, it is necessary to accurately assess the risk of ecosystem service degradation, and reveal the improvement path of regional

基金项目: 自然资源部国土整治中心外协课题(2021-06-06)

收稿日期: 2021-03-15; 网络出版日期: 2021-10-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jianpeng@urban.pku.edu.cn

ecological security and sustainability. However, existing studies mostly overlay all ecosystem services to assess the degradation risk of ecosystem services, and fail to integrate different types of ecosystem services in response to regional ecological problems or ecological needs. This research proposed a framework for ecosystem service degradation risk scenario simulation for multiple ecological conservation objectives. Considering three ecological conservation objectives of Guangdong Province with biodiversity conservation, water resources security and natural disaster prevention, representative ecosystem service types (habitat maintenance, water conservation, water quality purification, soil retention, flood mitigation, tropical cyclone mitigation) were selected. Degradation risk of ecosystem services for 2018—2035 was assessed based on Representative Concentration Pathways scenarios. The results showed that the spatial pattern of ecosystem services supply in Guangdong Province was basically stable from 2018 to 2035, although there was some degradation and strong spatial heterogeneity. Scenario simulation for ecosystem service degradation risks showed that high-risk areas of ecosystem service degradation for biodiversity conservation objective were located in Shenzhen, Foshan and Jiangmen in the Pearl River Delta, and Zhanjiang and Maoming in western and eastern Guangdong regions. The high-risk areas of ecosystem service degradation facing water resources security objective were located in Shenzhen, Zhongshan and Jiangmen in the Pearl River Delta, and Maoming, Jieyang and Jiangmen in the western and eastern Guangdong regions. The high-risk areas of ecosystem service degradation for natural disaster prevention objective were located in Shenzhen and Jiangmen in the Pearl River Delta, Maoming, Zhanjiang and Jieyang in the western and eastern Guangdong regions. These areas have high future ecological risks and is key area for ecosystem service degradation risk prevention in Guangdong Province. Facing multiple ecological conservation objectives, the Guangdong Province ecosystem service degradation risk response strategy should attach importance to the conservation of urban ecosystem biodiversity, strengthen the protection and restoration of ecological lands, especially mangroves, implement hierarchical management and control of watersheds, and carry out ecological protection and restoration projects oriented to multiple ecological conservation objectives according to local conditions. We should actively adopt climate change-related intervention policies and choose green and sustainable development paths with low resource consumption and low ecological impact.

Key Words: ecosystem service degradation risk; scenario simulation; biodiversity conservation; water resources security; natural disaster prevention

生态系统服务是指生态系统和生态过程所形成的人类赖以生存的环境条件和效用^[1],作为连接人类福祉和生态系统的关键纽带,其维持和改善是维持区域自然生命系统、保障区域生态安全的基础^[2]。然而,由于生态环境变化和人类需求增加,生态系统提供生态系统服务的能力正以前所未有的速度发生变化^[3-4]。政府间生物多样性和生态系统服务平台 2019 年发布的《生物多样性和生态系统服务全球评估报告》指出,多种人类因素已使得 75% 的陆地表面发生显著变化,自然生态环境正在全球范围内恶化,全球生物多样性与生态系统服务水平呈现迅速下降趋势^[5]。生态系统所受的人为与自然干扰加剧了生态系统服务退化风险,即区域无法维持稳定、协调、可持续的生态系统服务供给^[6]。因此,有必要对生态系统服务未来演化趋势进行模拟,有效规避、主动适应及综合管理生态系统服务退化风险,揭示区域生态安全和可持续提升路径,提升人类福祉。

目前生态系统服务退化风险研究主要基于两种途径:一是将生态系统服务纳入生态风险评估框架。生态风险是生态系统及其组分在自然或人类活动的干扰下所承受的风险^[7],主要基于风险源/汇和景观格局两类框架进行评估^[8-10]。例如,李俊翰等^[11]基于评价小区格网化核算生态系统服务价值和生态风险指数,分析二者动态变化特征及时空关联;曹祺文等^[12]提出了基于生态系统服务的景观生态风险评价框架;Liao 等^[13]将重要生态系统服务区作为风险受体,评价、预测城市综合生态风险。二是以生态系统服务退化表征生态风险。例如,Dong 等^[14]提出了基于生态系统服务的区域生态风险预警框架,根据 2000—2015 年生态系统服务

变化评估生态风险状态,识别出无风险、轻度、中度、高度和极高风险 5 个等级;Xu 等^[15]构建了生态系统服务生态风险评估模型,将生态系统服务与土地利用变化模型相结合,量化 1985—2020 年生态系统服务退化风险;王壮壮等^[16]提出了区域尺度的生态系统服务供需风险研究框架,揭示产水服务供需风险时空格局变化特征。综合来看,在评估生态系统服务退化风险时,现有研究多直接叠加所有生态系统服务,未能面向区域生态问题或生态需求对不同类型生态系统服务进行整合;在情景模拟方面,现有研究的情景选择比较单一,较少选择不同发展情景进行对比。

广东省是我国城市化发展最快速的地区之一,但随着社会经济的发展,自然生态系统显著受损,生态环境问题日益凸显,如生物多样性丧失、水质恶化、自然灾害频发等^[17-18]。在未来持续的人类活动影响下,广东省面临生态系统服务退化加剧的严峻挑战。本研究评估生态系统服务在未来不同发展情景下的退化风险,面向生物多样性保育、水资源安全与自然灾害防范三类生态保护目标评估生态系统服务退化风险,为广东省国土空间格局优化提供决策依据。

1 研究区与数据源

广东省位于我国华南地区,分为珠三角、粤东、粤西与粤北四个区域(图 1)。全省气候温暖湿润,年平均气温约 21.8℃,多年平均降雨量达 1789mm;地势北高南低,地形破碎,平原少,多山地丘陵,其中,山地占全省土地总面积的 33.7%、平原占 21.7%。广东省是我国改革开放后社会经济发展最快速的省份之一,是第一经济大省;在以珠江三角洲城市群为核心的经济引擎推动下,2020 年全省 GDP 总量达 110760.94 亿元,连续 32 年位居全国首位。在城市化水平长期高速提升以及全球气候变化趋势背景下,广东省未来因土地利用变化与气候变化引起的生态系统服务退化风险需引起重点关注。

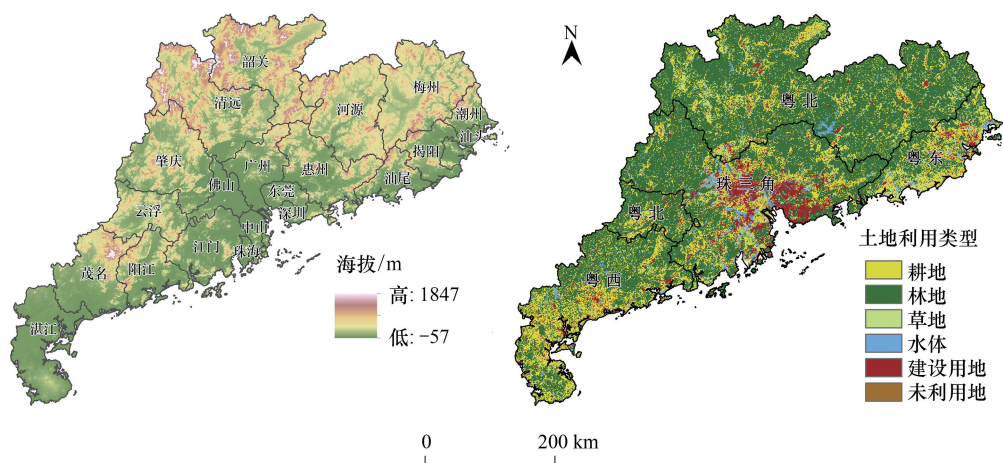


图 1 广东省地理位置与土地利用格局

Fig.1 Geographical location and land use pattern of Guangdong Province

本研究主要使用的数据为:(1)中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的中国土地利用现状遥感监测数据(2018 年, 1km×1km),土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地以及未利用地;(2)全球土地利用变化模拟数据集(https://geosimulation.cn/China_PFT_SSP-RCP.html)的土地利用模拟数据(2035 年, RCP 4.5 和 RCP 8.5, 1km×1km),土地利用类型分为耕地、林地、草地、水体、建设用地以及未利用地;(3)中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)的气象站点数据(2018 年, txt);(4)CMIP5 气候预估降尺度数据集(<https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-012-0464-y#Abs1>)的气象站点模拟数据(2035 年, RCP 4.5 和 RCP 8.5, met);(5)中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>)的 NDVI 空间分布数据(2018 年, 1km×1km);(6)世界土壤数据库(<http://www.fao.org/soils-portal/>)

soil-survey/soil-maps-and-databases/) 的土壤质地数据(1km×1km)。

2 研究方法

2.1 研究框架

本研究提出面向多重生态保护目标的生态系统服务退化风险情景模拟框架(图2)。在此框架中,2018年为初始年,基于“典型浓度路径”(Representative Concentration Pathways, RCPs) RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景,以流域为基本单元模拟不同 RCP 情景下 2018—2035 年广东省生态系统服务退化风险格局。首先,关注广东省重要生态保护目标并选取代表性生态系统服务类型进行评估,即生物多样性保育(生境维持)、水资源安全(水源涵养、水质净化)与自然灾害防范(土壤保持、洪水缓解、热带气旋缓解);其次,对比不同 RCP 情景下 2018—2035 年生态系统服务退化程度,采用“单一生态系统服务退化风险-面向生态保护目标的生态系统服务退化风险-综合生态系统服务退化风险”的递进框架评估广东省生态系统服务退化风险;最后,基于风险分析结果提出广东省生态系统服务退化风险应对策略。

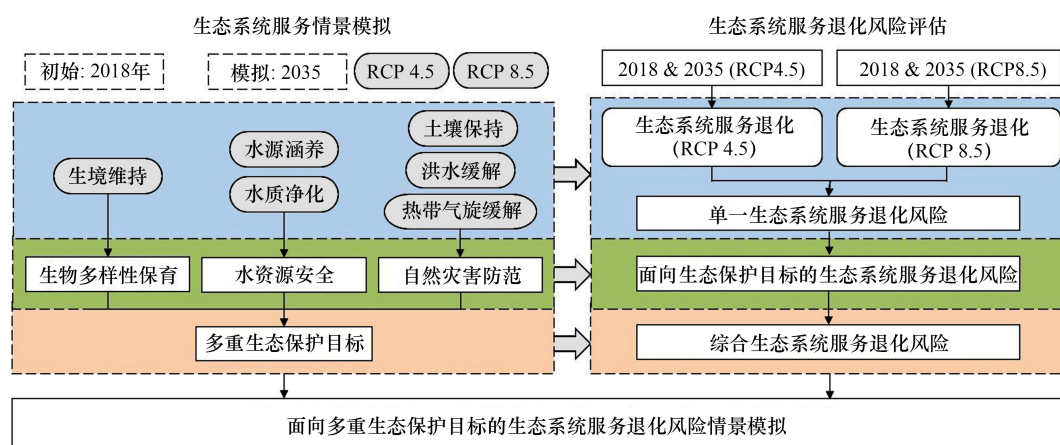


图2 面向多重生态保护目标的生态系统服务退化风险情景模拟框架

Fig.2 A framework for ecosystem service degradation risk scenario simulation for multiple ecological conservation objectives

RCP: 典型浓度路径 Representative concentration pathways

2.2 生态系统服务情景模拟

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)于2013年发布第五次评估报告,该报告中未来气候变化的预估主要基于全球耦合模型比较计划第五阶段(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)的地球系统模型结果^[19]。CMIP5模式数据采用“典型浓度路径”(Representative Concentration Pathways, RCPs)情景,包括RCP 2.6(人为温室气体低排放情景)、RCP 4.5(中排放情景)、RCP 6.0(中高排放情景)以及RCP 8.5(高排放情景)四种情景^[20—21]。其中,RCP 4.5是一种稳定情景,该情景下政府采取气候变化相关政策进行干预,全球人口总数达90亿后将减少,经济持续增长,并适当重视生态保护;RCP 8.5是无气候变化政策干预时的情景,该情景下全球人口与城市需求将不断增长,社会更多地关注发展而不是生态保护^[21—22]。本研究选取RCP 4.5和RCP 8.5情景进行模拟对比,以体现未来发展模式的差异。

面向广东省生物多样性保育目标,关注生境维持服务;面向广东省水资源安全目标,关注水源涵养和水质净化服务;面向广东省自然灾害防范目标,关注土壤保持、洪水缓解和热带气旋缓解服务。本研究分别评估了广东省2018、2035年RCP 4.5和RCP 8.5两种情景下的六种生态系统服务,其中2035年采用土地利用与气候模拟数据进行评估。生态系统服务评估方法如表1所示。

表 1 生态系统服务评估方法
Table 1 Methods of ecosystem services assessment

目标 Objective	生态系统服务 Ecosystem service	评估方法 Assessment method	计算公式 Computational formula	变量 Variable
生物多样性保育 Biodiversity conservation	生境维持	InVEST 模型生境质量模块:基于土地利用类型数据分析不同威胁源对各生境类型的影响程度 ^[23]	$HQ_{xj} = H_j \times \left[1 - \left(\frac{D_{xj}^z}{D_{xj}^z + k^z} \right) \right]$	HQ_{xj} 为土地利用类型 j 栅格 x 的生境维持服务, D_{xj} 为土地利用类型 j 栅格 x 的生境退化度, H_j 为土地利用类型 j 的生境适宜度
	水源涵养	基于 InVEST 模型产水模块先估算产水量 ^[24] ,再考虑土壤厚度、渗透性、地形指数、流速系数等因素估算水源涵养量 ^[25-26]	$WY_x = \left(1 - \frac{AET_x}{P_x} \right) \times P_x$ $WC_x = \min(1, 249 / \text{Velocity}) \times \min(1, 0.9 \times TI / 3) \times \min(1, K_{sat} / 300) \times WY_x$	WC_x 为栅格 x 的水源涵养量, K_{sat} 为土壤饱和导水率, Velocity 为流速系数, TI 为地形指数, WY_x 为产水量, AET_x 为实际蒸散量, P_x 为年降水量
自然灾害防范 Natural disaster prevention	水质净化	InVEST 模型水质净化模块:生态系统通过生态过程对外界输入氮负荷的实际固定量 ^[27]	$NDR_x = \lambda_x / \overline{\lambda_w} \times \text{pol}_x$	NDR_x 为栅格 x 的修正污染负荷值, pol_x 为栅格 x 的污染流出系数, $\overline{\lambda_w}$ 为研究区域平均径流指数, λ_x 为栅格 x 的径流指数
	土壤保持	RUSLE 模型:修正通用土壤流失方程 ^[28-29] ,潜在土壤侵蚀量减去实际土壤侵蚀量为土壤保持量	$SR = R \times K \times LS \times (1 - C \times P)$	SR 为土壤保持量, R 为降雨侵蚀力因子, K 为土壤可蚀性因子, L 为坡长因子, S 为坡度因子, C 植被覆盖因子, P 为水土保持措施因子
	洪水缓解	InVEST 模型城市洪水风险缓解模块:计算地表所保留的径流量 ^[30]	$FM_x = R_x \times P \times A$	FM_x 为栅格 x 径流保留量, R_x 为栅格 x 径流保留率,由土地利用类型与土壤特征决定, P 为暴雨深度, A 为栅格像元面积
	热带气旋缓解	根据土地利用类型、NDVI、坡度和土壤质地量化热带气旋缓解能力 ^[31]	$TC = \sqrt[4]{\text{slope} \times \text{soil} \times \text{LULC} \times \text{NDVI}}$	TC 为热带气旋缓解能力, slope 为坡度, soil 为土壤质地因子, LULC 为土地利用类型因子, NDVI 为植被覆盖因子

2.3 生态系统服务退化风险评估

本研究采用“单一生态系统服务退化风险-面向生态保护目标的生态系统服务退化风险-综合生态系统服务退化风险”的递进框架对广东省生态系统服务退化风险进行情景模拟与评估。首先,将 2035 年生态系统服务模拟结果与 2018 年初始状态相比较,分别计算 RCP 4.5 和 RCP 8.5 情景下生态系统服务变化量与变化率:

$$\Delta ES_i = ES_{i2} - ES_{i1} \tag{1}$$

$$RC_i = \frac{\Delta ES_i}{ES_{i1}} \tag{2}$$

式中, ES_{i1} 为第 i 种生态系统服务的初始值,即 2018 年; ES_{i2} 为第 i 种生态系统服务的模拟值,即 2035 年; ΔES_i 为第 i 种生态系统服务的变化量; RC_i 为第 i 种生态系统服务的变化率。根据变化率,每种生态系统服务发生退化的风险分为 5 个等级^[15]:高($RC_i \leq -20\%$)、较高($-20\% < RC_i \leq -5\%$)、中等($-5\% < RC_i \leq 5\%$)、较低($5\% < RC_i \leq 20\%$)、低($RC_i > 20\%$),退化风险等级数(RL)分别设为 5、4、3、2、1。

其次,综合考虑 RCP 4.5 和 RCP 8.5 两种情景下生态系统服务退化风险等级,将同一种服务两种情景下的退化风险等级数相加,识别两种情景下均发生高度退化的高级风险区,对单一生态系统服务退化风险进行综合分级:

$$EW_i = RL_{i1} + RL_{i2} \tag{3}$$

式中, RL_{i1} 为第 i 种生态系统服务第 1 种情景下(RCP 4.5)的退化风险等级数; RL_{i2} 为第 i 种生态系统服务第

2 种情景下(RCP 8.5)的退化风险等级数; EW_i 为第 i 种生态系统服务在两种情景下的退化风险等级加和,据此对单一生态系统服务退化风险进行综合分级:低($EW_i = 2, 3, 4$)、中($EW_i = 5, 6$)、高($EW_i = 7, 8$)、极高($EW_i = 9, 10$),单一生态系统服务退化风险等级数(WL)分别设为 1、2、3、4。

进一步,面向生物多样性保育(生境维持)、水资源安全(水源涵养、水质净化)与自然灾害防范(土壤保持、洪水缓解、热带气旋缓解)生态保护目标评估广东省生态系统服务退化风险。将同一生态保护目标下的多种生态系统服务退化风险等级数相加,对面向某一生态保护目标的生态系统服务退化风险进行分级:

$$ER_j = \sum WL_i \quad (4)$$

式中, WL_i 为同一目标下第 i 种生态系统服务退化风险等级数; ER_j 为面向第 j 种生态保护目标的生态系统服务退化风险等级数总和。据此进行每种生态保护目标下生态系统服务退化风险分级:低、中、高、极高,风险等级数(EL)分别设为 1、2、3、4。

最后,综合考虑生物多样性保育、水资源安全与自然灾害防范,将多目标下的生态系统服务退化风险等级数相加,评估面向多重生态保护目标的综合生态系统服务退化风险:

$$IER = \sum EL_j \quad (5)$$

式中, EL_j 为第 j 种生态保护目标的生态系统服务退化风险等级数; IER 为多重生态保护目标下的生态系统服务退化风险等级数总和,据此进行综合生态系统服务退化风险分级:低($IER = 3$)、中($IER = 4, 5, 6$)、高($IER = 7, 8, 9$)、极高($IER = 10, 11, 12$)。

3 结果分析

3.1 生态系统服务时空演变

2018—2035 年广东省生态系统服务空间格局基本稳定,每种生态系统服务空间异质性明显,2035 年生态系统服务相比 2018 年有所退化(图 3)。具体而言,生境维持服务高值位于粤北山区林地,众多林地适宜生物栖息,低值位于珠三角、汕头市、茂名市。其中,RCP 4.5 情景下生境维持服务平均值为 0.723,RCP 8.5 情景下平均值为 0.717,相比于 2018 年的 0.78 均发生明显退化。水源涵养服务高值位于清远市、茂名市、湛江市及揭阳市山区,植被冠层、落叶以及根系对降水有良好拦蓄作用,低值位于珠三角城市群建设用地,水源涵养能力弱。RCP 4.5 情景下水源涵养服务平均值较 RCP 8.5 情景高,分别为 49.64mm 和 46.88mm,但相比于 2018 年的 71.57mm 均显著退化。水质净化服务高值位于梅州市、清远市、河源市的林地,低值位于佛山市、中山市及茂名市,水质净化能力弱。土壤保持服务高值位于粤北山区以及珠三角东西两翼沿海,低值位于珠三角以及雷州半岛。洪水缓解与热带气旋缓解服务高值位于粤北山地地区,该区域植被覆盖度较高,洪水缓解与热带气旋缓解能力较强;低值位于珠三角城市群,特别是佛山市和深圳市,该区人类活动强,不透水表面覆盖度高,导致灾害缓解能力较弱。

3.2 单一生态系统服务退化风险

将 2035 年生态系统服务模拟结果(RCP 4.5、RCP 8.5 情景)与 2018 年初始状态相比较,广东省生态系统服务退化风险如图 4 所示。生境维持服务高度退化区位于珠三角沿岸、茂名市、湛江市、揭阳市以及汕头市;与 RCP 4.5 相比,RCP 8.5 情景下生境维持服务高度退化区发生扩张,主要发生在茂名市、江门市以及揭阳市,高度退化流域由 228 增加为 253 个。水源涵养服务高度退化区位于深圳市、江门市、阳江市和茂名市;RCP 4.5 至 RCP 8.5 情景,水源涵养服务高度退化区扩张主要发生在珠三角沿岸与粤西沿岸,高度退化流域由 182 增加为 259 个。水质净化服务高度退化区位于湛江市、江门市、茂名市和揭阳市;RCP 4.5 至 RCP 8.5 情景,水质净化服务高度退化流域由 242 增加为 277 个。土壤保持服务高度退化区位于阳江市、江门市、中山市和珠海市,从 RCP 4.5 到 RCP 8.5 情景,高度退化区主要以阳江市、江门市和珠海市为中心扩张,高度退化流域由 132 增加为 278 个。洪水缓解服务高度退化区位于湛江市、茂名市、佛山市以及揭阳市,从 RCP 4.5 到 RCP 8.5 情景,高度退化区主要以湛江市、茂名市和揭阳市为中心扩张,高度退化流域由 272 增加为 284 个。

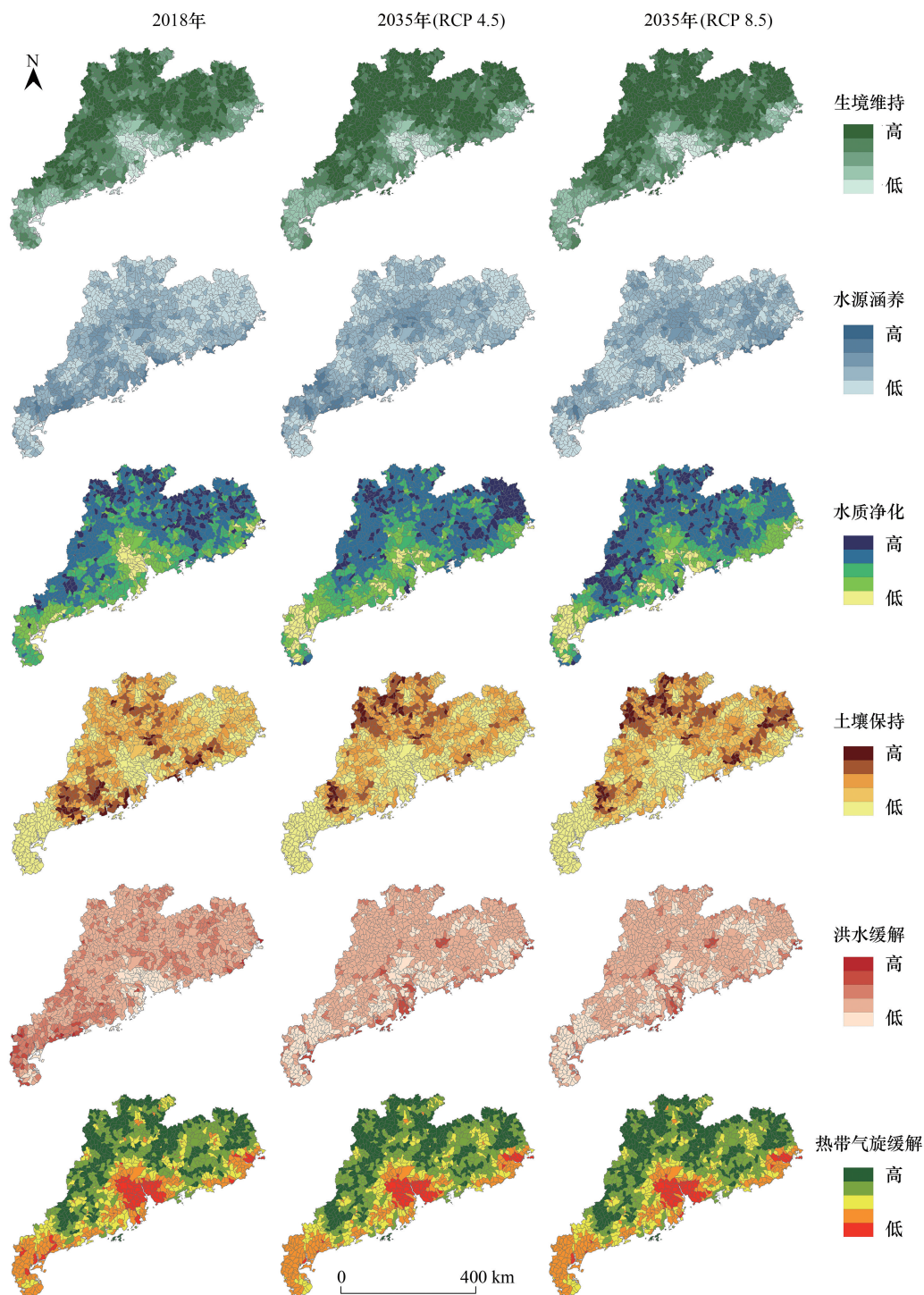


图 3 2018—2035 年广东省生态系统服务空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecosystem services in Guangdong Province from 2018 to 2035

热带气旋缓解服务高度退化区位于深圳市、广州市、佛山市、潮州市以及汕头市,从 RCP 4.5 到 RCP 8.5 情景,高度退化区以珠三角和揭阳市为中心扩张、高度集中,高度退化流域由 240 增加为 254 个。

3.3 综合生态系统服务退化风险

综合考虑 RCP 4.5 与 RCP 8.5 两种情景下生态系统服务退化程度,对生态系统服务退化风险进行分级:

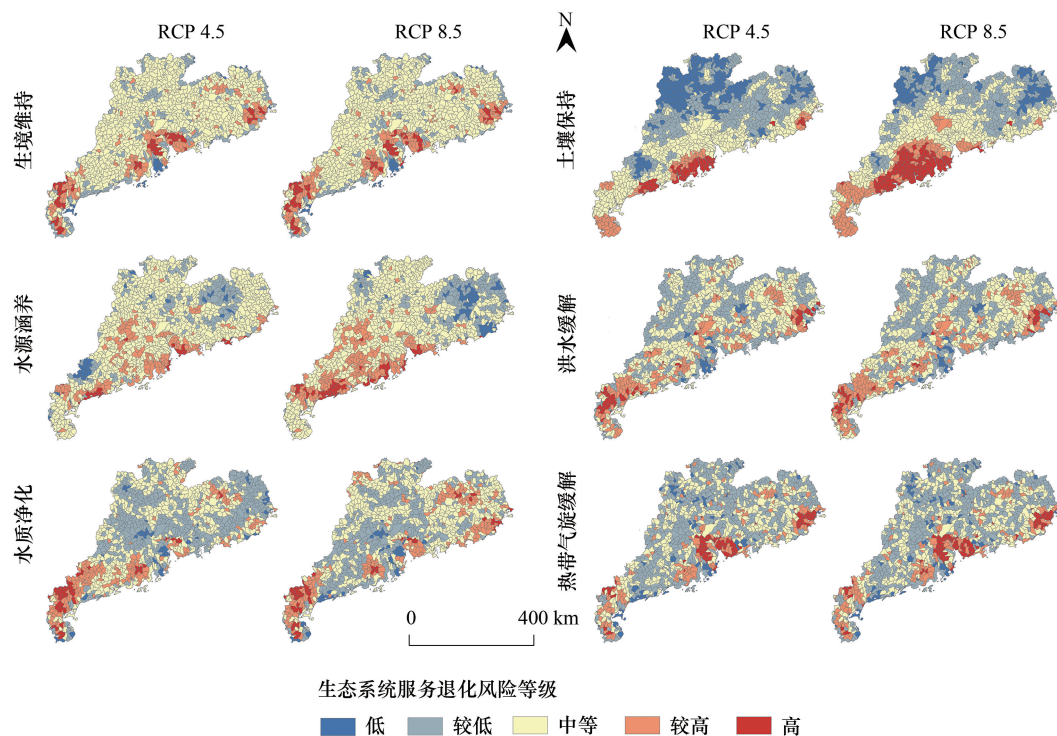


图 4 2018—2035 年广东省不同情景生态系统服务退化风险

Fig.4 Ecosystem services degradation risk in Guangdong Province from 2018 to 2035 under the scenarios of RCP 4.5 and RCP 8.5

极高、高、中与低(图 5)。具体而言,生境维持服务高风险区位于珠三角沿岸城市群以及粤西和粤东区域的湛江市、茂名市和揭阳市。水源涵养服务高风险区位于粤西沿岸的茂名市、阳江市和江门市。水质净化服务高风险区位于粤西、粤东与粤北的东部,以湛江市、茂名市为主。土壤保持服务高风险区位于珠三角沿海地区。洪水缓解服务高风险区位于粤西沿岸与粤东沿岸的茂名市、湛江市、揭阳市以及汕头市。热带气旋缓解服务高风险区位于中山市、佛山市、东莞市、揭阳市与汕头市。

面向生物多样性保育(生境维持)、水资源安全(水源涵养、水质净化)以及自然灾害防范(土壤保持、洪水缓解、热带气旋缓解)多重生态保护目标对生态系统服务退化风险进行评估(图 6)。研究结果表明,面向生物多样性保育目标的生态系统服务退化风险同生境维持服务退化风险;面向水资源安全目标的生态系统服务退化高风险区位于珠三角的深圳市、中山市和江门市,以及粤西与粤东地区的茂名市、揭阳市和江门市,土地利用以耕地与建设用地为主,难以有效截留降水,耕地由于过度施肥等人类活动易受到污染,在土地利用变化与气候变化影响下面临更大的水资源安全风险;面向自然灾害防范目标的生态系统服务退化高风险区位于珠三角的深圳市与江门市、粤西与粤东地区的茂名市、湛江市和揭阳市,不透水面占比高,下渗能力弱,面临更高的沿海灾害风险。对多重生态保护目标下的生态系统服务退化风险进行综合,可以发现极高风险区分布茂名市、江门市、深圳市与揭阳市,是广东省生态风险防范的关键区域。

4 讨论

4.1 多情景生态系统服务权衡

生态系统服务权衡源于生物物理系统与自然生态资源的约束,即增加一种生态系统服务可能导致其他生态系统服务的减少^[32-33]。为了更清晰地表征不同生态系统服务间的权衡与协同关系,本研究将 2018 年与 2035 年 RCP 4.5、RCP 8.5 两种情景下的生态系统服务平均值进行 z-score 标准化^[34]后绘制权衡关系玫瑰图(图 7),明晰区域生态系统服务权衡特征。

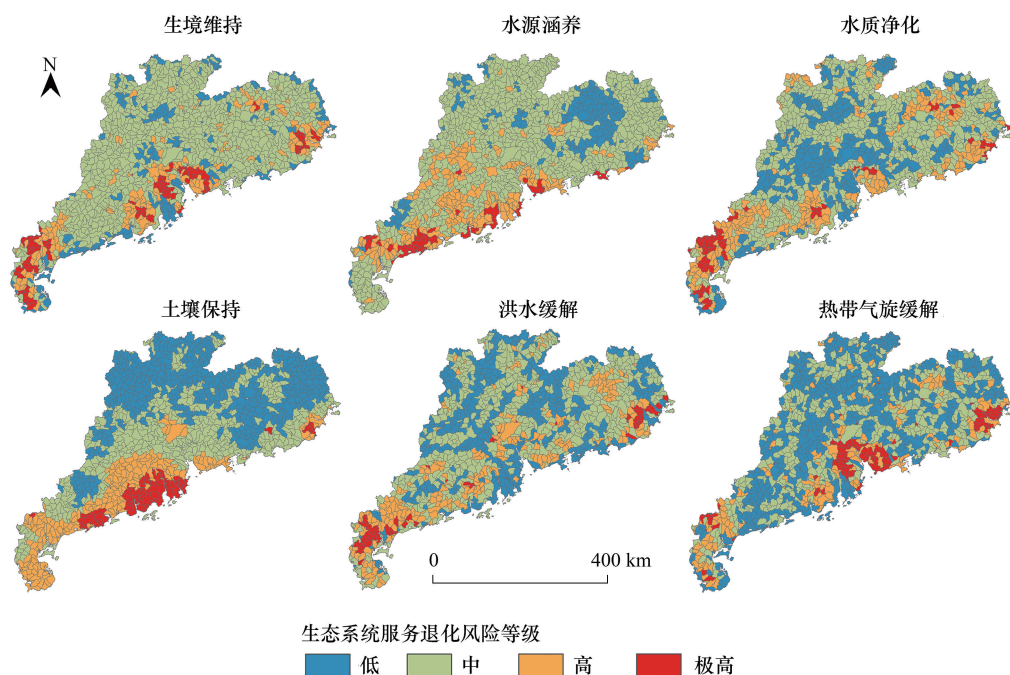


图5 2018—2035年广东省单一生态系统服务退化风险

Fig.5 Ecosystem services degradation risk in Guangdong Province from 2018 to 2035

2018年广东省生境维持服务、水源涵养服务和洪水缓解服务水平高,整体生态系统服务水平较高,权衡关系较弱。2035年RCP 4.5情景下,热带气旋缓解服务与水质净化服务水平有较大提升,生境维持服务、水源涵养服务和洪水缓解服务水平显著下降,水土保持服务变化不大,生态系统服务之间的矛盾趋向严峻,权衡关系加强。2035年RCP 8.5情景下,广东省整体生态系统服务水平显著下降,生态系统服务之间权衡关系较弱,呈协同下降趋势。总体而言,2018年六种生态系统服务供给水平最为均衡,生物多样性保育、水资源安全与自然灾害防范目标得到保障;2035年,RCP 4.5相比于RCP 8.5情景提供了更高水平生态系统服务,RCP 8.5意味着未来更高强度的发展,社会经济水平发展的同时生态系统服务显著退化。为实现社会经济发展和生态保护的共赢,推动广东省实现生态系统服务退化风险最小化以及人类福祉最大化,应在科学开展风险评估的基础上对未来发展进行合理规划、加强风险防范。

4.2 生态系统服务退化风险应对

基于生态系统服务退化风险评估结果,本研究梳理了广东省存在的主要生态问题。首先,城市发展与生物多样性保育存在矛盾。生物多样性保育高风险区分布在珠三角城市群,沿海城市发展区人口密度与城镇开发建设强度高,未来发展情景下城市扩张强度大,且近岸海域生境质量易受到围填海工程、环境污染等影响,生境维持服务退化风险高^[5]。其次,粤西水资源安全存在较高风险。该区域多属山地暴流性小河,受未来气候变化影响较大,因水土流失严重水源涵养能力退化明显,建设用地扩张与生态用地减少也使得水质净化能力下降^[35]。同时,珠三角以及粤东、粤西沿海地区的灾害缓解能力风险高。随未来城市化进程和气候变化加剧,沿海区域水土流失区域有增大趋势,水土保持能力可能持续退化。并且,随着河流淤泥沉积,洪水缓解能力也将受到影响。植被覆盖度的下降也将导致应对热带气旋等沿海灾害的能力减弱^[36]。

因此,广东省生态系统服务退化风险应对策略包括:(1)面向生物多样性保育目标,应重视城市生态系统的生物多样性保护,加强绿色基础设施建设,提升城市群森林绿地体系建设的连通性和协同性,为生物提供栖息地与迁徙廊道;(2)面向水资源安全目标,应加强对重要水体的保护,将高风险区域目前的高质量生态用地、水源地及水源涵养区等纳入严格保护范围;(3)面向自然灾害防范目标,应加强沿海红树林等高风险区防

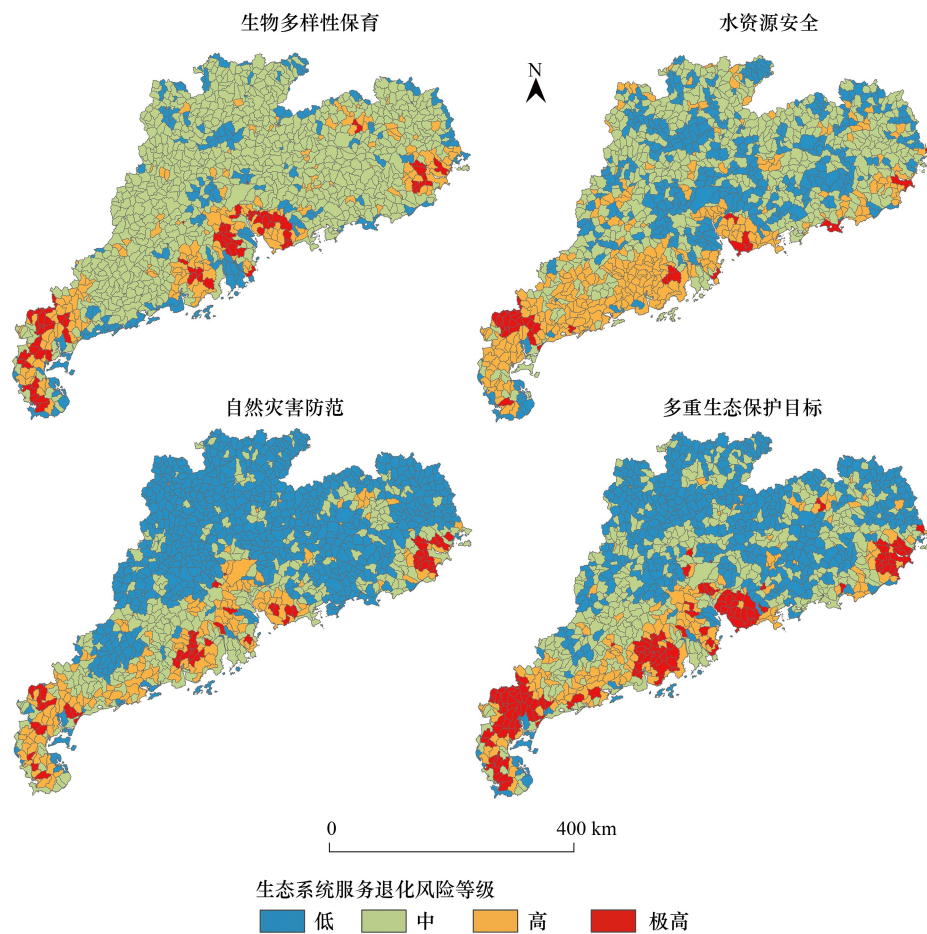


图 6 2018—2035 年广东省面向生态保护目标的生态系统服务退化风险

Fig.6 Ecosystem service degradation risk for ecological conservation objectives in Guangdong Province from 2018 to 2035

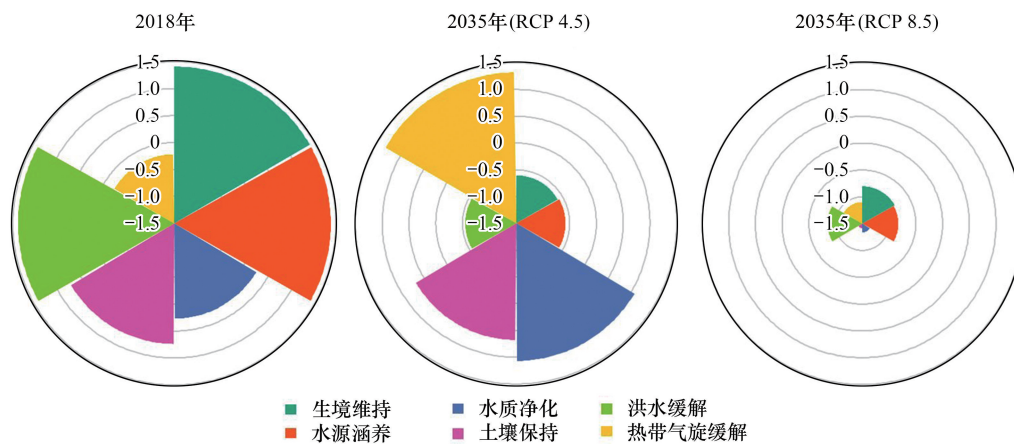


图 7 广东省不同情景生态系统服务权衡

Fig.7 Ecosystem services trade-offs under different scenarios in Guangdong Province

护林的保护及恢复,提升自然灾害适应力;(4)基于生态系统服务退化风险等级进行分级管控与应对,因地制宜开展面向多重生态保护目标的生态保护与修复工程,切实提高风险应对能力;(5)积极采取气候变化相关

干预政策,优选低资源消耗低生态影响的绿色可持续发展路径。

5 结论

本研究以广东省为例,提出面向多重生态保护目标的生态系统服务退化风险情景模拟框架,对广东省不同发展情景下的生态系统服务退化风险进行模拟。研究结果显示,2018—2035 年广东省生态系统服务空间格局基本稳定,各类生态系统服务空间异质性明显,2035 年生态系统服务相比 2018 年有所退化。对多重生态保护目标下的生态系统服务退化风险进行情景模拟,高风险区分布在珠三角城市群以及粤西、粤东沿海地区,尤其是茂名市、江门市、深圳市与揭阳市,是广东省生态系统服务退化风险预防的关键区域。面向多重生态保护目标,广东省需要因地制宜优选生态系统服务风险应对策略。

参考文献 (References):

- [1] Daily G C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington, DC: Island Press, 1997.
- [2] Yang W, Dietz T, Kramer D B, Ouyang Z Y, Liu J G. An integrated approach to understanding the linkages between ecosystem services and human well-being. *Ecosystem Health and Sustainability*, 2015, 1(5): 1-12.
- [3] Lennox E, Gowdy J. Ecosystem governance in a highland village in Peru: facing the challenges of globalization and climate change. *Ecosystem Services*, 2014, 10: 155-163.
- [4] Verburg P H. Simulating feedbacks in land use and land cover change models. *Landscape Ecology*, 2006, 21(8): 1171-1183.
- [5] International Panel on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). *Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Bonn, Germany: IPBES, 2019.
- [6] Maron M, Mitchell M G E, Runtz R K, Rhodes J R, Mace G M, Keith D A, Watson J E M. Towards a threat assessment framework for ecosystem services. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(4): 240-248.
- [7] Munns Jr W R. Assessing risks to wildlife populations from multiple stressors: overview of the problem and research needs. *Ecology and Society*, 2006, 11(1): 23.
- [8] Environmental Protection Agency. *Guidelines for Ecological Risk Assessment*. Washington, DC, USA: EPA, 1998: 26846-26924.
- [9] Moraes R, Molander S. A procedure for ecological tiered assessment of risks (PETAR). *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2004, 10(2): 349-371.
- [10] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 宗敏丽, 胡晓旭. 景观生态风险评价研究进展与展望. *地理学报*, 2015, 70(4): 664-677.
- [11] 李俊翰, 高明秀. 滨州市生态系统服务价值与生态风险时空演变及其关联性. *生态学报*, 2019, 39(21): 7815-7828.
- [12] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 吴健生. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK. *地理学报*, 2018, 73(5): 843-855.
- [13] Liao J F, Jia Y Q, Tang L N, Huang Q L, Wang Y Y, Huang N, Hua L Z. Assessment of urbanization-induced ecological risks in an area with significant ecosystem services based on land use/cover change scenarios. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 2018, 25(5): 448-457.
- [14] Dong T, Xu W H, Zheng H, Xiao Y, Kong L Q, Ouyang Z Y. A framework for regional ecological risk warning based on ecosystem service approach: a case study in Ganzi, China. *Sustainability*, 2018, 10(8): 2699.
- [15] Xu X B, Yang G S, Tan Y, Zhuang Q L, Li H P, Wan R R, Su W Z, Zhang J. Ecological risk assessment of ecosystem services in the Taihu Lake Basin of China from 1985 to 2020. *Science of the Total Environment*, 2016, 554-555: 7-16.
- [16] 王壮壮, 张立伟, 李旭谱, 李英杰, 王鹏涛, 延军平. 区域生态系统服务供需风险时空演变特征——以陕西省产水服务为例. *生态学报*, 2020, 40(6): 1887-1900.
- [17] Xu K, Wang Y P, Su H, Yang J X, Li L L, Liu C. Effect of land-use changes on nonpoint source pollution in the Xizhi River watershed, Guangdong, China. *Hydrological Processes*, 2013, 27(18): 2557-2566.
- [18] Pan X Y, Liang D, Zeng W, Hu Y M, Liang J C, Wang X W, Robinson S K, Luo X, Liu Y. Climate, human disturbance and geometric constraints drive the elevational richness pattern of birds in a biodiversity hotspot in southwest China. *Global Ecology and Conservation*, 2019, 18: e00630.
- [19] IPCC. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [20] Moss R H, Edmonds J A, Hibbard K A, Manning M R, Rose S K, Van Vuuren D P, Carter T R, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl G A, Mitchell J F B, Nakicenovic N, Riahi K, Smith S J, Stouffer R J, Thomson A M, Weyant J P, Wilbanks T J. The next generation of scenarios for

- climate change research and assessment. *Nature*, 2010, 463(7282): 747-756.
- [21] Van Vuuren D P, Edmonds J, Kainuma M, Riahi K, Thomson A, Hibbard K, Hurtt G C, Kram T, Krey V, Lamarque J F, Masui T, Meinshausen M, Nakicenovic N, Smith S J, Rose S K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 2011, 109(1): 5-31.
- [22] Kim J, Choi J, Choi C, Park S. Impacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. *Science of the Total Environment*, 2013, 452-453: 181-195.
- [23] Terrado M, Sabater S, Chaplin-Kramer B, Mandle L, Ziv G, Acuña V. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning. *Science of the Total Environment*, 2016, 540: 63-70.
- [24] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, Chiew F H S, Western A W, Briggs P R. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. *Water Resources Research*, 2004, 40(2): W02502.
- [25] 傅斌, 徐佩, 王玉宽, 彭怡, 任静. 都江堰市水源涵养功能空间格局. *生态学报*, 2013, 33(3): 789-797.
- [26] 包玉斌, 李婷, 柳辉, 马涛, 王怀香, 刘康, 沈茜, 刘心浩. 基于 InVEST 模型的陕北黄土高原水源涵养功能时空变化. *地理研究*, 2016, 35(4): 664-676.
- [27] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 844-852.
- [28] Feng T, Chen H S, Polyakov V O, Wang K L, Zhang X B, Zhang W. Soil erosion rates in two karst peak-cluster depression basins of northwest Guangxi, China: comparison of the RUSLE model with ¹³⁷Cs measurements. *Geomorphology*, 2016, 253: 217-224.
- [29] 陈思旭, 杨小唤, 肖林林, 蔡红艳. 基于 RUSLE 模型的南方丘陵山区土壤侵蚀研究. *资源科学*, 2014, 36(6): 1288-1297.
- [30] 刘怡娜, 孔令桥, 肖焱, 郑华. 长江流域景观格局与生态系统水质净化服务的关系. *生态学报*, 2019, 39(3): 844-852.
- [31] Shih S S, Hsieh H L, Chen P H, Chen C P, Lin H J. Tradeoffs between reducing flood risks and storing carbon stocks in mangroves. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 105: 116-126.
- [32] King E, Cavender-Bares J, Balvanera P, Mwampamba T H, Polasky S. Trade-offs in ecosystem services and varying stakeholder preferences: evaluating conflicts, obstacles, and opportunities. *Ecology and Society*, 2015, 20(3): 25.
- [33] 傅伯杰, 于丹丹. 生态系统服务权衡与集成方法. *资源科学*, 2016, 38(1): 1-9.
- [34] Peng J, Hu X X, Wang X Y, Meersmans J, Liu Y X, Qiu S J. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in northwestern Yunnan, China. *Ecosystem Services*, 2019, 39: 100998.
- [35] Cong W C, Sun X Y, Guo H W, Shan R F. Comparison of the SWAT and InVEST models to determine hydrological ecosystem service spatial patterns, priorities and trade-offs in a complex basin. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106089.
- [36] Shih S S, Hsieh H L, Chen P H, Chen C P, Lin H J. Tradeoffs between reducing flood risks and storing carbon stocks in mangroves. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 105: 116-126.