

过去50年气候变化下中国潜在植被NPP的脆弱性评价

苑全治^{1,2}, 吴绍洪^{3,4}, 戴尔阜^{3,4}, 赵东升^{3,4}, 任平^{1,2}, 张学儒⁵

(1. 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610068;

2. 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610101; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;

4. 中国科学院陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101; 5. 重庆交通大学, 重庆 400074)

摘要: 借助动态植被模型IBIS, 首先模拟了过去50年(1961-2010年)气候变化下中国潜在植被NPP的动态变化, 然后采用IPCC第五次评估报告选定的标准气候态时段(1986-2005年)平均气候状态作为“标准年气候”, 并将该气候条件下的潜在植被NPP作为评价基准。通过与基准进行比较, 计算每一年潜在植被NPP的波动情况, 进而评价该年的气候条件是否使潜在植被“不适应”以及“不适应”的程度, 最后根据过去50年的“不适应”次数和程度综合判断气候变化下潜在植被NPP的脆弱性。评价结果显示: 在过去50年的气候变化下, 天山以南的暖温带荒漠生态系统、北方温带草原生态系统以及青藏高原西部的高寒草原生态系统更容易受到气候变化的不利影响, NPP呈现出较高的脆弱性; 而大部分以森林为主的生态系统则不容易受到气候变化的影响, NPP脆弱性较低, 其中以常绿阔叶林和针叶林为主的生态系统NPP脆弱性更低。此外, 天山以北的温带荒漠生态系统以及青藏高原中部和东部的高寒草原草甸生态系统NPP也呈现出较低的脆弱性。

关键词: 气候变化; 潜在植被; NPP; 脆弱性; IBIS; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201605008

1 引言

脆弱性是事物易受不利影响的倾向或习性, 包括对危害的敏感性或易感性以及应对和适应能力的缺乏^[1]。脆弱性评价能够为维护系统的可持续发展, 减轻外部胁迫对系统的不利影响和为退化系统的综合整治提供决策依据^[2-3]。1909-2011年, 中国陆地地区平均增温0.9~1.5℃, 近15年来的气温上升处于百年来气温最高阶段。降水变化的区域差异明显, 其中西部干旱、半干旱地区近30年来降水持续增加^[4]。强烈的气候变化对中国自然生态系统分布、生产力、服务功能等已经造成了可辨识的影响^[5], 揭示气候变化下中国自

收稿日期: 2016-01-04; 修订日期: 2016-03-19

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530749); 四川省教育厅科技项目(15ZB0023); 国家自然科学基金青年项目(41301196, 41501202); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2014jcyjA0808) [Foundation: Key projects of National Natural Science Foundation of China, No.41530749; Science and Technology Project of Sichuan Provincial Department of Education, No.15ZB0023; Youth Projects of National Natural Science Foundation of China, No.41301196, No.41501202; Chongqing Foundation and Advanced Research Project, No. cstc2014jcyjA0808]

作者简介: 苑全治(1985-), 男, 山西应县人, 博士, 讲师, 中国地理学会会员(S110010187M), 主要从事自然地理学综合研究。E-mail: yuanqz@sicnu.edu.cn

通讯作者: 吴绍洪(1961-), 男, 广东潮州人, 博士, 研究员, 博士生导师, 中国地理学会会员(S110000894M), 主要从事自然地理学综合研究。E-mail: wush@igsnr.ac.cn

然生态系统的脆弱性,已经成为国内学者的重要课题^[6-8]。

“潜在植被”是在当前气候背景及无人干扰情况下,立地植被所能发育演替形成的最稳定、最成熟的一种顶极植被类型,可反映特定气候条件下植被发展的总体趋势^[9]。随着人类活动对自然生态系统的直接影响越来越显著,气候变化对自然生态系统的影响也越难从中分离。因此,基于模型模拟的潜在植被,评价中国自然生态系统在气候变化下的脆弱性,已经成为很多学者的共识^[10-12]。

净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是绿色植物在单位面积和单位时间内所累积的有机质数量^[13]。NPP不仅直接反映了生态系统的生产能力和质量状况,也是判定碳源/汇的主要因子,在全球碳循环中扮演着重要的角色^[14]。本文利用气候—植被模型,模拟过去50年(1961-2010年)气候变化下中国潜在植被NPP的动态变化,评价潜在植被NPP在气候变化下的脆弱性,为合理预测未来气候变化对自然生态系统的不良影响,进而有针对性的采取措施以减缓和适应气候变化,保护和恢复自然生态系统提供科学依据。

2 模型、数据与敏感性分析

2.1 模型

气候—植被模型是研究区域和全球尺度上植被和气候相互作用的主要工具,借助模型能够分析植被特征参数、生态系统分布、结构和功能变化及其与气候变化的相互影响^[15]。这些模型可分为基于经验关系的统计模型和基于生态过程和机理的陆地生物圈过程模型。统计模型如生命地带模型^[16]、Miami模型^[13]等,该类模型未考虑植物的生理过程以及气候变化下生态系统结构和功能复杂的变化,因此在生态系统对气候变化的响应研究中有一定的局限性。陆地生物圈过程模型可分为生物地理模型、生物地球化学模型和大气圈—生物圈动态耦合模型。生物地理模型通过设置生长期、极端最低温度等生态生理约束条件,来判定植物功能型的竞争和分布,如BIOME1^[17]、MAPPS^[18]等模型,这类模型的缺陷在于不能模拟植被变化随时间变化的动态过程,不能够反映植被响应对环境变化的滞后现象。生物地球化学模型通过模拟生态系统光合作用、呼吸作用和土壤微生物分解过程,能够计算植物—土壤—大气之间碳和养分循环,如CENTURY^[19]、DOLY^[20]等模型。生物地球化学模型虽然弥补了平衡态模型不能描述植被与环境之间动态过程的缺陷,但却不能模拟长期气候变化导致的植被组成和结构的变化。大气圈—生物圈动态耦合模型考虑植被与环境的动态过程以及植被对环境变化的滞后响应,能够模拟植被的瞬时变化与气候的动态影响,如IBIS^[21-22]、LPJ^[23]等模型,已经成为气候—植被关系研究中的一个重要发展方向。

集成生物圈模型IBIS(Integrated Biosphere Simulator)作为一个动态植被模型DGVM(Dynamic Global Vegetation Model),整合了地表物理过程、冠层生理特征、植物物候、植被动态变化和竞争、碳循环、氮循环等陆地生物圈中一系列生物物理和生物地球化学过程,能够模拟大气—植被之间的动态过程(图1)。Yuan等通过对模型参数进行调整,使IBIS能够较为准确的模拟中国潜在植被格局和潜在植被NPP^[24-25]。本文将基于改进后的IBIS模型,评价1961-2010年中国潜在植被NPP在气候变化下的脆弱性。

2.2 数据

本文中模型的输入和输出数据分辨率均为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,输入数据包括地形数据、土壤数据和气象数据。

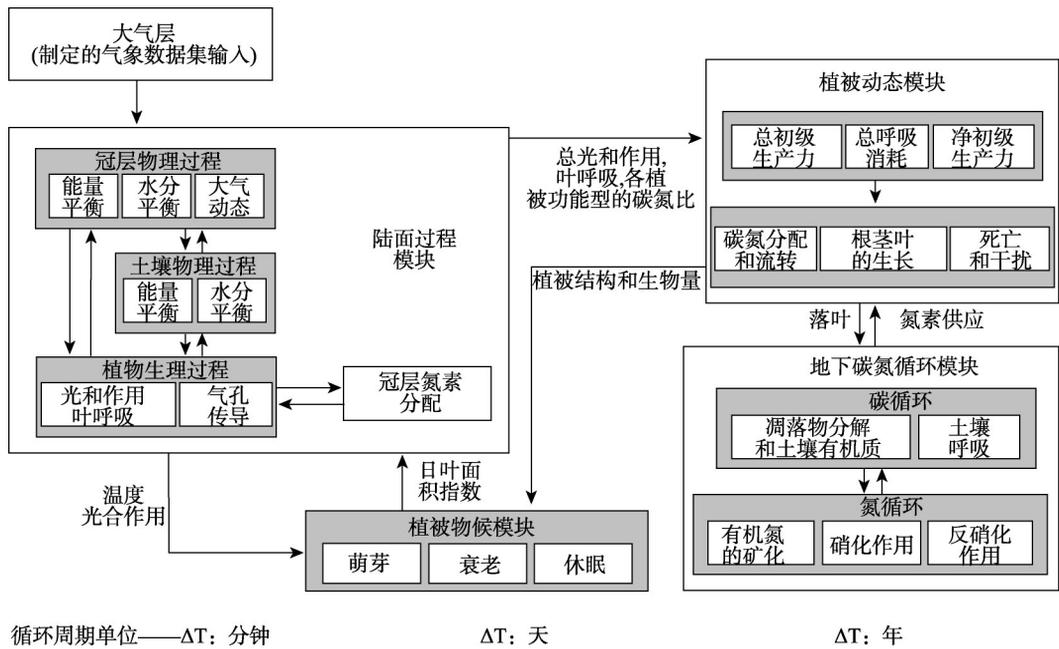


图1 IBIS模型的分级框架结构
Fig. 1 Hierarchical framework of IBIS model

(1) 地形数据：对全国30"分辨率的DEM重采样后，获得模型所需的0.5°×0.5°经纬网格高程数据。

(2) 土壤数据：包括6个土壤层（从顶部到底端分别是0.10 m，0.15 m，0.25 m，0.50 m，1.00 m和2.00 m）的土壤质地数据，数据来自IGBP-DIS（1999）^[26]。

(3) 气象数据：模型所需的气象数据（月平均气温、月平均最高气温、月平均最低气温、月极端最低气温、月降水量、雨日、月平均相对湿度、月平均风速和月平均日照百分率）源于全国约756个气象站点。气象站点数据的网格化是基于ANUSPLIN软件完成的，该软件已经在气象数据插值研究中得到广泛应用^[27]。插值结果显示气温、日照百分率、相对湿度、降水量和雨日的拟合度较高（观测值与模拟值的 $R^2 > 0.9$ ， $p < 0.05$ ），风速的拟合度稍差（观测值与模拟值的 $R^2 > 0.8$ ， $p < 0.05$ ），但能够满足本文需要。

2.3 气候要素敏感性分析

气候要素敏感性分析是研究由于输入的气候要素变化所能引起的模型响应程度的手段，是模拟结果分析与讨论的重要依据。本文采用相对敏感度算法（公式1），分析IBIS模型模拟的NPP相对于输入的气候要素的敏感性：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(Q_{i+1} - Q_i) / Q_b}{(P_{i+1} - P_i) / 100}}{n + 1} \quad (1)$$

式中： S 为相对敏感度； P_i 、 P_{i+1} 分别是第*i*、*i+1*次计算时输入数据的调整百分率； Q_b 为模型在原输入数据下的输出结果； Q_i 、 Q_{i+1} 分别是第*i*、*i+1*次计算模型的输出结果。

计算结果显示，热带树种和北方树种NPP对气温变化较为敏感，这是由于我国热带和北方树种面积基数小，温度变化导致的上述两类植物功能性分布面积的变化，会引起二者NPP较大的相对变化量。大多植被功能型NPP对温差、风速、雨日变化的敏感性较

表1 气候要素敏感性分析
Tab. 1 The sensitivity analysis of climatic data input

植被功能型	气候要素相对敏感度						
	气温 (°C)	温差 (°C)	降水量 (mm)	相对湿度 (%)	云量 (%)	风速 (m/s)	雨日 (d)
热带常绿阔叶树	5.229	-0.032	0.375	0.682	-0.278	0.011	-0.219
热带雨绿阔叶树	6.818	-0.037	0.361	0.692	-0.277	0.013	-0.216
亚热带常绿阔叶树	-0.684	-0.040	0.174	0.442	-0.141	-0.002	-0.045
温带常绿针叶树	-0.026	-0.081	0.553	1.082	0.184	-0.053	-0.092
温带落叶阔叶树	0.001	-0.086	0.656	0.733	0.186	-0.033	-0.064
北方常绿针叶树	-1.876	-0.062	0.292	0.886	-0.082	-0.040	-0.051
北方落叶阔叶树	-4.010	-0.093	0.654	0.759	0.136	-0.039	-0.069
北方落叶针叶树	-4.311	-0.073	0.356	0.572	0.012	-0.030	-0.040
常绿灌木	-0.480	-0.097	0.371	0.324	-0.764	-0.163	0.120
落叶灌木	-0.485	-0.069	0.212	0.261	-0.686	-0.031	0.176
暖性(C4)草	3.601	-0.020	0.559	0.611	-1.916	-0.049	0.390
冷性(C3)草	-1.590	-0.116	0.348	0.510	-0.022	-0.042	-0.035

小, 而对于降水量、相对湿度和云量变化的敏感性适中(表1)。

3 脆弱性评价与结果分析

3.1 脆弱性评价方法

评价一个系统的脆弱性通常需要与该系统的“常态”做比较, 这个“常态”即脆弱性的评价基准^[28]。本文参考IPCC第五次评估报告定义的标准气候态时段, 把1986-2005年的20年平均气候状态设定为“标准年气候”, 并把这个状态下的潜在植被NPP作为评价基准, 定量评价1961-2010年气候变化下潜在植被NPP的脆弱性。

自然生态系统NPP有其自然波动的范围, Minnen等通过对多年气候变化下欧洲自然生态系统NPP波动情况的模拟, 发现约80%的NPP波动在多年平均值 $\pm 10\%$ 之间, 所以确定以NPP的变化量不超过多年平均的10%作为划分系统脆弱与否的阈值^[29]。石晓丽模拟了中国自然生态系统NPP的正常波动范围, 计算结果分别为 $\pm 9.9\%$ 和 $\pm 8.5\%$ ^[30], 与Minnen等的研究结果相近。因此, 本文把NPP低于评价基准10%以下视为植被对气候变化的不适应, 并按照NPP低于评价基准10%、40%、60%和80%^[31], 将不适应的等级划分为轻度不适应、中度不适应、重度不适应和极度不适应。本文将根据过去50年气候变化下潜在植被表现出的“不适应”次数和程度来综合评价NPP的脆弱性, 具体公式如下:

$$V = \sum_{i=1}^n A_j \quad (2)$$

式中: V 代表脆弱性综合得分; i 表示第 i 年(n 为50); j 表示气候变化下潜在植被的适应性等级; A_j 表示某一年潜在植被的适应性等级所对应的分数(无不适应为0, 轻度不适应为1, 中度不适应为2, 重度不适应为3, 极度不适应为4)。

3.2 脆弱性评价结果分析

根据过去50年气候变化下各网格潜在植被NPP脆弱性评价的得分情况, 对脆弱性等级进行划分, 分别是脆弱性低(0~20分)、脆弱性较低(20~40分)、脆弱性较高(40~80分)和脆弱性高(>80分)(图2)。脆弱性高的区域主要位于天山南部的温带荒漠区,

面积占全国总面积的9.1%；脆弱性较高的区域主要位于温带草原区、藏北羌塘高寒草原区以及冀中南落叶阔叶林区，面积占全国总面积的18.9%；脆弱性较低的区域主要集中在冀中南以外的暖温带落叶阔叶林区、青藏高原中部高寒草原区、南岭以南的亚热带常绿阔叶林区以及热带雨林、季雨林区，面积占全国总面积的30.3%；脆弱性低的区域主要包括东北寒温带针叶林区、温带针叶和落叶阔叶混交林区、天山北部的温带荒漠区、青藏高原北部高寒荒漠区、青藏高原东部高寒草甸区、横断山针叶林区、南岭以北的亚热带常绿阔叶林区、云贵高原及四川盆地常绿阔叶林区，面积占全国总面积的41.7%。

由评价结果可见，内蒙古西部的阿拉善地区、甘肃河西走廊、新疆塔里木盆地、青海柴达木盆地等温带半灌木、灌木荒漠区域，由于植被稀疏、生态系统结构单一，容易受到气候变化的影响，潜在植被的NPP脆弱性等级最高；东北松辽平原、内蒙古高原和黄土高原等区域发育了以草类为主的草原植被，同时由于贺兰山的阻隔作用，削弱了西北高寒气流的东袭，阻止了沙漠的东移，使草原植被能够发育良好，较西部的荒漠生态系统结构复杂，抗干扰能力也更强，潜在植被NPP在气候变化下的脆弱性等级为较高；河北中南部的暖温带落叶阔叶林区，在过去50年气候变化下潜在植被NPP的脆弱性等级也为较高，原因可能与该区处于暖温带半湿润气候和温带半干旱气候之间，年际气温、降水波动较大有关；陕西关中平原、山东中南部、山西中东部、江苏和安徽北部、以及河南大部等黄河中下游地区的潜在植被主要是暖温带落叶阔叶林，生态系统结构相对草原生态系统要复杂，生态系统功能也相对稳定，但由于该区域经常出现旱涝等气象灾害，导致气候变化下潜在植被NPP的脆弱性等级为较低；地处亚热带湿润地区的闽、粤、桂低山丘陵常绿阔叶林区降水变率较大，旱涝灾害频繁，而热带的海南岛和雷州半岛热量丰富但偶有寒潮，当较强寒流南下时可能出现短暂的霜冻^[32]，使生态系统功能受损，气候变化下潜在植被NPP的脆弱性相对于长江中下游地区的中亚热带常绿阔叶林较高；青藏高原由东南向西北，降水量逐渐减少、温度逐渐降低，自然条件越来越恶劣，潜在植被也由东南部的高寒草甸，过渡到中部的高寒草原，在西北部则为高寒荒漠，生态系统的抗干扰能力逐步降低，潜在植被NPP在气候变化下的脆弱性也逐渐升高。

4 结论

以气候变暖为标志的气候变化正在改变着自然生态系统固有的自然过程，其后果已经逐步威胁到人类的福祉和其他生物的繁衍生息。潜在植被的净初级生产力（Net Primary Productivity, NPP）能够直接反映自然生态系统的质量状况，本文采用模型模拟

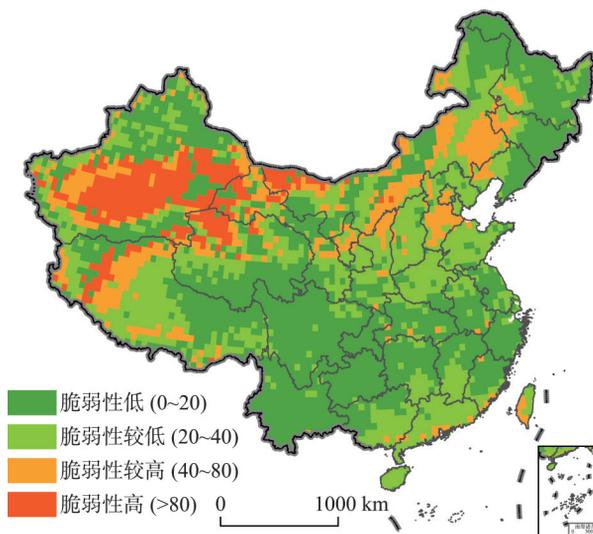


图2 过去50年气候变化下中国自然生态系统的脆弱性空间分布

Fig. 2 Natural ecosystem vulnerability to climate change in China in the past 50 years

的方法,利用IBIS模型定量评价了过去50年(1961-2010年)中国潜在植被NPP在气候变化下的脆弱性。主要结论如下:

(1) 基于潜在植被,通过气候数据驱动植被模型的方法,可以将人类活动对自然生态系统的直接影响与气候变化的影响分离,有利于定量分析气候变化对自然生态系统的影响,进而研究自然生态系统在气候变化下的脆弱性。本文所采用的IBIS模型,是一个动态植被模型,能够反映气候与植被之间的动态关系,对气候变化下潜在植被的时空动态模拟较为符合实际,采用该模型研究气候变化下的脆弱性也具有较高的参考价值。

(2) 评价一个系统的脆弱性通常需要与该系统的“常态”做比较,这个“常态”即脆弱性的评价基准。本文参考IPCC最新一次评估报告中选定的标准气候时段,采用1986-2005年平均气候状态作为“标准年气候”,并将该气候条件下的潜在植被NPP作为评价基准。在脆弱性评价时,首先基于评价基准计算每一年潜在植被NPP的波动情况,判断该年的气候条件是否使潜在植被产生“不适应”以及“不适应”的程度,然后根据过去50年气候变化下“不适应”的出现次数和程度,综合判断潜在植被NPP的脆弱性。

(3) 根据脆弱性评价结果,在过去50年(1961-2010年)天山以南的暖温带荒漠生态系统、北方温带草原生态系统以及青藏高原西部的高寒草原生态系统更容易受到气候变化的不利影响,潜在植被NPP呈现出较高的脆弱性;而以森林为主的生态系统则不容易受到气候变化的不利影响,潜在植被NPP脆弱性较低,其中以常绿阔叶林和针叶林为主的生态系统脆弱性更低。此外,天山以北的温带荒漠生态系统以及青藏高原中部和东部的高寒草原草甸生态系统潜在植被NPP也呈现出较低的脆弱性。

5 讨论

5.1 与相关研究成果比较

本文评价结果与叶笃正1992年发表的《中国生态环境敏感带分布图》和赵跃龙1999年发表的《中国脆弱生态环境分布图》具有一致性。《中国生态环境敏感带分布图》中敏感带的分布区域在本文的评价结果中脆弱性等级均比较高^[33]。本文中脆弱性高和脆弱性较高的区域属于《中国脆弱生态环境分布图》中的“北方半旱半湿润脆弱区”、“西北半干旱脆弱区”、“华北平原脆弱区”^[34]。

吴绍洪等采用AVIM2模型模拟了B2情景下未来气候变化对自然生态系统的影响,预测了21世纪气候变化下中国自然生态系统的脆弱性^[10];於琮等应用改进后的CEVSA模型,评价了A2气候情景下的中国自然生态系统脆弱性^[11];赵东升等利用LPJ模型模拟了A2、B2、A1B未来气候情景下中国自然生态系统的变化,评估了中国自然生态系统响应未来气候变化的脆弱性^[12]。上述研究均深入探讨了未来气候情境下中国自然生态系统的脆弱性,从研究的结果来看,西北干旱荒漠地区以及青藏高原中西部地区更容易受未来气候变化的影响,呈现较高的脆弱性,这与本文的评价结果相近。对于温带草原、暖温带落叶阔叶林、亚热带常绿阔叶林以及热带雨林和季雨林生态系统的脆弱性评价结果因脆弱性评价所选取的指标不同、模型不同而有所差异,但总的趋势仍然是西北干旱区和青藏高原区植被在气候变化下的脆弱性要明显高于东部季风区。

5.2 脆弱性主导因子分析

气候变化下潜在植被NPP脆弱性是各气候要素变化对潜在植被影响的综合,本文拟采用相关分析方法,通过比较各经纬网格内单个气候要素与潜在植被NPP之间的相关关

系,找出相关关系最为显著的一个气候要素,作为该网格潜在植被NPP脆弱性可能的主导气候因子,其结果如下:

图3显示,23.6%的经纬网格内,脆弱性与单个气候要素相关系数的最大值介于-0.3和0.3之间,相关关系较弱,说明过去50年这些区域的潜在植被NPP脆弱性是多个气候要素综合作用的结果,如脆弱性高的暖温带荒漠大部分区域;57.7%的经纬网格内,脆弱性与单个气候要素相关关系的最大值的绝对值介于0.3和0.5之间,说明过去50年这些区域的潜在植被NPP脆弱性和某个气候要素的变化存在一定的相关关系,但相关性不高,其他气候要素对于潜在植被NPP的影响不可忽略,如脆弱性较高的温带草原区和冀中南落叶阔叶林区可能受降水量的影响较多,降水量的减少会导致草原和落叶阔叶林NPP降低;其余18.7%的经纬网格内,脆弱性与单个气候要素相关关系的最大值的绝对值介于0.5和0.8之间,说明过去50年这些区域的潜在植被NPP脆弱性和某个气候要素的变化存在较强的相关关系,这个气候要素就有可能是该区域自然生态系统脆弱的主导气候因子,如NPP脆弱性高的柴达木盆地荒漠植被,其西部的主导气候因子可能是风速,东部的主导气候因子可能是降水量,风速过大或者降水量的减少都会导致荒漠植被NPP降低。总体来看,中国过去50年潜在植被NPP脆弱性可能的主导气候因子大多与降水相关,如降水量、雨日、相对湿度等。降水量和相对湿度对于中国潜在植被NPP的影响多是正向的。雨日对灌木林NPP有正向影响,但对乔木林NPP有微弱的负向影响,这可能与雨日增加虽然提高了降水量,但同时也降低了太阳辐射量有关系(表1)。

5.3 不确定性分析

本文中的不确定性主要来自与数据有关的不确定性和模型相关的不确定性两个方面。在数据方面,本文用到的气候数据均来自气象站点的实测数据,但现有的气象数据观测站在西部地区 and 台湾分布较少,使得气候数据插值结果的精度受到一定影响。如在脆弱性评价结果中,藏南高山谷地以及台湾南部地区的潜在植被NPP的脆弱性等级为较高,这可能与该区域气象站点分布较少,而且启用年代较晚有关系。在模型方面,本文中采用的模拟精度为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 经纬网格,每个网格平均面积约 2500 km^2 ,在模拟时假设每个网格内气候数据、地形数据、土壤数据以及模拟的生态系统类型和NPP是一致的,因此,本文对于全国或者大区域尺度上的研究具有参考意义,但对于小区域尺度上的研究则可参考性不足。在未来的研究工作中,应在进一步提高数据空间分辨率和数据精度

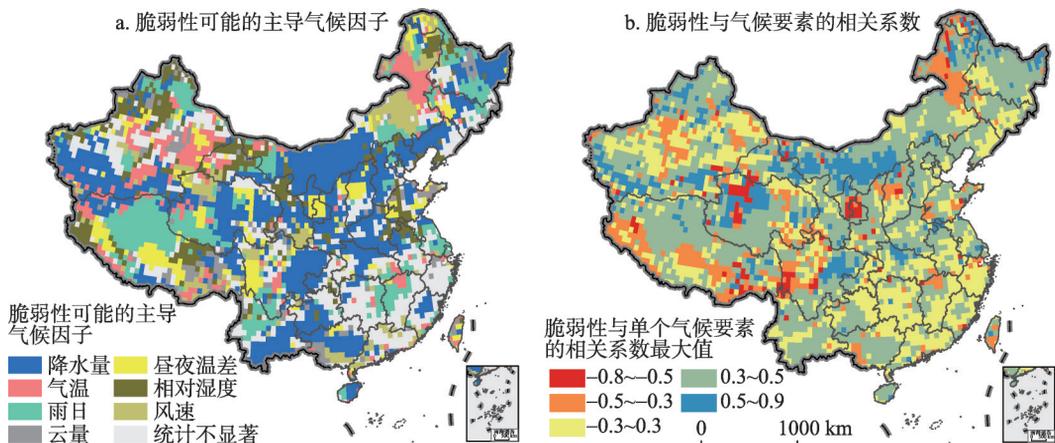


图3 脆弱性可能的主导气候因子及其与脆弱性之间的相关系数($p < 0.05$)

Fig. 3 The possible leading factors of vulnerability & the correlation coefficient between these factors and vulnerability

的基础上, 结合区域社会经济发展状况, 分析小空间尺度上潜在植被在气候变化下的脆弱性。

5.4 未来研究展望

本文只探讨了潜在自然植被在气候变化下的脆弱性, 对于人工植被, 尤其是农田生态系统在气候变化下的脆弱性研究仍亟待深入。由于农田生态系统受人类活动的直接干扰, 所以对其脆弱性的研究除了考虑气候因素外, 还要考虑人类的耕作行为对农作物生长环境的影响, 如翻耕、灌溉、施肥、除草等。这就需要综合利用地理学和生态学的相关理论与方法, 根据不同典型区农田生态系统特征, 修改动态植被模型(GDVM)并验证, 使其能够准确模拟研究区农田生态系统过程, 在区域尺度上构建“大气—植被—土壤”之间的耦合模型, 为揭示区域气候变化下农田生态系统变化机制, 合理制定耕地保护政策提供科学依据。

参考文献(References)

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [2] Fang Chuanglin, Wang Yan. A comprehensive assessment of urban vulnerability and its spatial differentiation in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2015, 70(2): 234-247. [方创琳, 王岩. 中国城市脆弱性的综合测度与空间分异特征. *地理学报*, 2015, 70(2): 234-247.]
- [3] Cai Yunlong. Sensitivity and adaptation of chinese agriculture under global climate change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 202-212. [蔡运龙. 全球气候变化下中国农业的脆弱性与适应对策. *地理学报*, 1996, 51(3): 202-212.]
- [4] Editorial Committee of National Assessment Report of Climate Change. Third National Assessment Report of Climate Change. Beijing: Science Press, 2014. [气候变化国家评估报告编写委员会. 第三次气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2014.]
- [5] Wu Shaohong, Huang Jikun, Liu Yanhua, et al. Pros and Cons of climate change in China. *China Population, Resources and Environment*, 2014, 24(1): 7-13. [吴绍洪, 黄季焜, 刘燕华, 等. 气候变化对中国的影响利弊. *中国人口. 资源与环境*, 2014, 24(1): 7-13.]
- [6] Liu Yanhua, Li Xiubin. *Fragile Ecological Environment and Sustainable Development*. Beijing: The Commercial Press, 2007. [刘燕华, 李秀彬. 脆弱生态环境与可持续发展. 北京: 商务印书馆, 2007.]
- [7] Tian Yaping, Chang Hao. Bibliometric analysis of research progress on ecological vulnerability in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 67(11): 1515-1525. [田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. *地理学报*, 2012, 67(11): 1515-1525.]
- [8] Li Kerang, Chen Yufeng. Analysis of vulnerability of forest in China responded to global climate change. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(Suppl.1): 40-49. [李克让, 陈育峰. 全球气候变化影响下中国森林的脆弱性分析. *地理学报*, 1996, 51(Suppl.1): 40-49.]
- [9] Tuxen R. Die heutige potentielle natuerliche Vegetation als Gegenstand der vegetationskartierung. *Angewandte Pflanzensoziologie*. 1956, 13: 5-42.
- [10] Wu Shaohong, Dai Erfu, Huang Mei, et al. Study on the vulnerability of ecological system in China under the future climate change scenario (B2) in 21st century. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(7): 811-817. [吴绍洪, 戴尔阜, 黄玫, 等. 21世纪未来气候变化情景(B2)下中国生态系统的脆弱性研究. *科学通报*, 2007, 52(7): 811-817.]
- [11] Yu Li, Cao Mingkui, Tao Bo, et al. Quantitative assessment of the vulnerability of terrestrial ecosystems of China to climate change based on potential vegetation. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 521-530. [於琰, 曹明奎, 陶波, 等. 基于潜在植被的中国陆地生态系统对气候变化的脆弱性定量评价. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 521-530.]
- [12] Zhao Dongsheng, Wu Shaohong. Vulnerability of natural ecosystem in China under regional climate scenarios: An analysis based on eco-geographical regions. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(5): 602-610. [赵东升, 吴绍洪. 气候变化情景下中国自然生态系统脆弱性研究. *地理学报*, 2013, 68(5): 602-610.]
- [13] Lieth H, Whittaker R H. *Primary Productivity of the Biosphere*. New York: Springer-Verlag, 1975.

- [14] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geographical Research*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [15] Li Kerang, Huang Mei, Tao Bo, et al. *Process Modeling of China's Terrestrial Ecosystem and Its Response to Global Change*. Beijing: China Meteorological Press, 2009. [李克让, 黄玫, 陶波, 等. 中国陆地生态系统过程及对全球变化响应与适应的模拟研究. 北京: 气象出版社, 2009.]
- [16] Holdridge L R. Determination of world plant formations from simple climatic data. *Nanotechnology*, 1947, 105(2727): 299-303.
- [17] Prentice I C, Cramer W, Harrison S P, et al. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. *Journal of Biogeography*, 1992, 19(19): 117-134.
- [18] Neilson R P. A Model for predicting continental-scale vegetation distribution and water balance. *Ecological Applications*, 1995, 5(2): 362-385.
- [19] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. observation and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 785-809.
- [20] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(4): 471-490.
- [21] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, et al. An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(4): 603-628.
- [22] Kucharik C J, Foley J A, Delire C, et al. Testing the performance of a Dynamic Global Ecosystem Model: Water balance, carbon balance, and vegetation structure. *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, 14(3): 795-825.
- [23] Sitch S, Smith B, Prentice I C, et al. Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography, and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biology*, 2003, 9(2): 161-185.
- [24] Yuan Q Z, Zhao D S, Wu S H, et al. Validation of the Integrated Biosphere Simulator in simulating the potential natural vegetation map of China. *Ecological Research*, 2011, 26(5): 917-929
- [25] Yuan Q Z, Wu S H, Zhao D S, et al. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 3-17
- [26] International Geosphere-Biosphere Program - Data and Information System (IGBP-DIS), Global Soil Data Task: Spatial Data base of Soil Properties, Toulouse, France, 1999.
- [27] Hutchinson M F. The application of thin plate splines to continent wide data assimilation, *Data Assimilation Systems*, BMRC Research Report No. 27. Melbourne: Bureau of Meteorology, 1991.
- [28] Metzger M J, Schroter D, Leemans R, et al. A spatially explicit and quantitative vulnerability assessment of ecosystem service change in Europe. *Regional Environmental Change*, 2008, 8(3): 91-107.
- [29] Minnen J G, van Onigkeit J, Alcamo J. Critical climate change as an approach to assess climate change impacts in Europe: Development and application. *Environmental Science & Policy*, 2002, 5(4): 335-347.
- [30] Shi Xiaoli. Risk assessment of Chinese Ecosystem under climate change scenarios [D]. Beijing: Institute of Geographical Sciences and Natural Resource Research, Chinese Academy of Sciences, 2009. [石晓丽. 气候变化情景下中国生态系统风险评价[D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所, 2009.]
- [31] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zhao Huixia, et al. Recognition of ecosystem response to climate change impact. *Advances in Climate Change Research*, 2005, 1(3): 115-118. [吴绍洪, 尹云鹤, 赵慧霞等. 生态系统对气候变化适应的辨识. 气候变化研究进展, 2005, 1(3): 115-118.]
- [32] Zheng Du, et al. *Chinese Eco-geographical Regionalization Research*. Beijing: The Commercial Press, 2008. [郑度, 等. 中国生态地理区域系统研究. 北京: 商务印书馆, 2008.]
- [33] Ye Duzheng. *Prestudy of China's Global Change*. Beijing: China Meteorological Press, 1992. [叶笃正. 中国的全球变化预研究. 北京: 气象出版社, 1992.]
- [34] Zhao Yuelong. *Types Distribution and Comprehensive Improvement of Fragile Ecological Environment in China*. Beijing: China Environmental Science Press, 1999. [赵跃龙. 中国脆弱生态环境类型分布及其综合整治. 北京: 中国环境科学出版社, 1999.]

NPP vulnerability of China's potential vegetation to climate change in the past 50 years

YUAN Quanzhi^{1,2}, WU Shaohong^{3,4}, DAI Erfu^{3,4}, ZHAO Dongsheng^{3,4},
REN Ping^{1,2}, ZHANG Xueru⁵

(1. Key Lab of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest China, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chengdu 610068, China; 2. Institute of Geography and Resources Science, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4 Key Laboratory of Land Surface Pattern and Simulation, CAS, Beijing 100101, China; 5. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: By using the IBIS, a dynamic vegetation model, this study firstly simulated the NPP dynamics of China's potential vegetation in the past 50 years (1961-2010). Then according to the Fifth Assessment Report by IPCC, this study used the average climate conditions during 1986-2005 as the "standard climate", and took the NPP of the potential vegetation in this climate condition as the evaluation basis. Compared with the evaluation basis, the NPP fluctuation of each year was calculated to judge whether the potential vegetation adapts the climate change or not. Meanwhile, the degree of the inadaptability was evaluated. Finally, the NPP vulnerability of potential vegetation was evaluated by synthesizing the times and degrees of inadaptability to the climate change during the past 50 years. Results showed that: the NPP of the desert ecosystems south of the Tianshan Mountains, and the NPP of grassland ecosystems in northern China and western Tibetan Plateau were more likely to be impacted by the climate change in the study period. The NPP vulnerability of these ecosystems to climate change in the past 50 years was relatively high. The NPP of most of the forest ecosystems was not likely to be influenced by climate change. The NPP vulnerability to climate change of the evergreen broadleaved forests and coniferous forests was lower. Additionally, the NPP of the desert ecosystems north of Tianshan Mountains, and the NPP of the grassland ecosystems in the central and eastern parts of the Tibetan Plateau had lower vulnerability to climate change.

Keywords: climate change; potential vegetation; NPP; vulnerability; IBIS; China