

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2013.03.005

气候变化下老哈河流域潜在植被动态变化模拟

邓欢欢¹,袁 飞¹,任立良¹,周瑜佳¹,常帅鹏¹,马 贺^{1,2},赵晶晶¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
2. 河南省漯河水文水资源勘测局,河南 漯河 462001)

摘要:依据老哈河流域自然地理特征,对 LPJ 模型参数进行修正,对比模拟的基准年潜在植被分布与 TM 遥感数据解译的 2000 年土地覆被数据,发现改进的 LPJ 模型能较好地模拟老哈河流域植被类型的空间分布趋势。采用 IPCC-SRES B2 情景气候数据和 LPJ 模型模拟 2000—2100 年老哈河流域潜在植被对气候变化的响应。结果表明:2071—2100 年老哈河流域林地面积大幅度增加,呈现向东和向北移动趋势,而草本植被逐渐减少;各月平均叶面积指数除 2020s 夏季外均高于基准年;在气候变化情景下,植被净初级生产力南高北低分布的格局基本不变,但总量逐渐上升,且原本净初级生产力值较高的南部地区增加最为明显。

关键词:气候变化;潜在植被;LPJ 模型;老哈河流域

中图分类号:P467 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2013)03-0019-06

Simulation of dynamic changes of potential vegetation in Laohahe Basin under scenario of climate change

DENG Huanhuan¹, YUAN Fei¹, REN Liliang¹, ZHOU Yujia¹, CHANG Shuaipeng¹,
MA He^{1,2}, ZHAO Jingjing¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Luohe Investigation Bureau of Hydrology and Water Resources of Henan Province, Luohe 462001, China)

Abstract: Based on the physiographical features of the Laohahe Basin, the bioclimatic parameters of the LPJ model were modified. The spatial distribution of potential vegetation in the base year computed by the modified LPJ model was in agreement with the land cover data obtained through interpreting TM remote sensing information in the Laohahe Basin in 2000, indicating that the modified LPJ model can better simulate the spatial distribution of potential vegetation in the Laohahe Basin. The LPJ model was used for simulation of the response of potential vegetation to climate change under results of the Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Emission Scenarios (IPCC SRES) B2. The results show that forestland area will increase greatly, and tend to move northward and eastward during the period from 2071 to 2100, while herbaceous vegetation coverage will decrease. The mean monthly values of the leaf area index (LAI) will be higher than those in the base year except for summers of the 2020s. Under the scenario of future climate change, the spatial pattern of net primary productivity (NPP) decreasing from the south to the north will show less change. However, the total NPP will gradually increase, with a significant increase in the south.

Key words: climate change; potential vegetation; LPJ model; Laohahe Basin

2007 年气候变化政府间研究小组 IPCC 第 4 次 1980—1999 年相比将增加 1.1 ~ 6.4℃,极端天气气候事件发生的频率也可能增加。植被作为气候变化评估报告^[1]指出:21 世纪末全球近地表平均气温与

基金项目:国家自然科学基金(50909033);高等学校学科创新引智计划项目(B08048)
作者简介:邓欢欢(1989—),女(土家族),硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟分析及水文预报。E-mail:dhuanh@126.com

和人类活动最重要的响应之一^[2],其结构、组成和空间分布将随着气候的变化而变化,进而影响流域的蒸散发,对流域的水文循环过程和水资源量的时空分布产生影响。因此,评估长时间序列尺度下气候变化对流域水资源的影响时,必须考虑植被未来的变化趋势,评估结果可为区域水资源保护提供依据。

目前,通常采用植被气候分类模型对各种气候条件下植被生态系统的组成和结构进行模拟,以研究植被与气候的关系^[3]。动态全球植被模型(如LPJ模型、IBIS、Sheffield-DGVM等)能预测植被结构和功能的瞬时变化,常被用来评价气候变化对自然植被的可能影响,这是近年来相关全球变化生态学研究的一种发展趋势^[3]。赵东升等^[4]应用改进后的LPJ模型模拟了气候变化情景下中国自然植被净初级生产力(net primary productivity,以下简称NPP)的分布变化;Ni等^[5]应用LPJ模型在中国森林区域进行了一系列试验模拟,探讨了气候变化对植被的影响;袁飞等^[6-7]将LPJ模型应用到汉江流域,模拟分析了不同气候变化情景下汉江流域潜在自然植被分布及NPP变化情况,并将模拟结果应用于水文过程的模拟研究;孙艳玲等^[8]根据中国气候特点,对LPJ模型参数进行调整,模拟分析了20世纪4个气候阶段中国潜在自然植被的分布变化。本研究采用修正后的LPJ模型对老哈河流域潜在植被进行模拟分析,预测气候变化情景下的植被响应,量化长期气候变化对老哈河流域潜在植被的影响。

1 研究区概况与相关数据

1.1 概况

老哈河发源于内蒙古宁城县与河北省平泉县交界的七老图山区,是西辽河的源头西拉木伦河的一级支流。本文的研究区域为老哈河兴隆坡水文站以上的集水区域,位于北纬41°~43°,东经117°~120°,集水面积18 112 km²。老哈河流域属于温带半干旱大陆性气候,干燥少雨多风沙,降水量时空分布不均,降雨主要集中在雨季(5—10月),1964—2008年多年平均降水量为425 mm^[9]。老哈河流域的上游多为林地覆盖,植被良好,土壤侵蚀较轻;中下游地区受人类活动影响较大,多为黄土丘陵区,地表植被覆盖率较低,水土流失较严重^[9-10]。

表 1 平均气温和月降水量 MK 法趋势检验

类别	MK 统计量											
	春季			夏季			秋季			冬季		
	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	1 月	2 月
月平均气温	3.026	4.14	7.189	7.243	5.694	6.403	6.558	6.177	4.997	5.104	4.157	4.169
月降水量	0.679	-0.262	-0.292	-0.351	0.721	-0.334	0.530	1.465	1.191	0.661	1.465	0.054

1.2 相关数据

LPJ 模型由日平均气温、日降水、月云量、土壤质地和 CO₂ 年平均质量浓度等数据驱动。模型运行过程中,月云量数据将被插值为日时间序列。

本研究采用的气象数据为 1971—2000 年老哈河流域邻近 4 个气象站实测的日气温数据、流域内 44 个雨量站实测的日降水数据以及 CRU2.0 月云量数据。根据我国“十二五”中长期发展规划,我国未来发展的选择与区域可持续发展(IPCC-SRES B2,以下简称 B2)情景接近^[2],因此对未来植被变化进行模拟时选取 B2 情景下日降水量、日最高/最低气温数据作为模型的气候输入数据。本文土壤数据采用 USDA(美国农业部)提供的 5'×5'的土壤质地数据,CO₂ 浓度数据则采用 LPJ 模型工作组提供的全球年平均 CO₂ 浓度数据。

将 1971—2100 年气候数据分为 4 个年代际:基准期(1971—2000 年)、2020s(2011—2040 年)、2050s(2041—2070 年)和 2080s(2071—2100 年)。统计分析 B2 情景下老哈河流域年均气温和年降水量变化趋势,结果显示 21 世纪老哈河流域年平均气温呈显著上升趋势(图 1):基准年年平均气温为 7.0℃,2020s、2050s、2080s 多年平均气温较基准年分别增加 0.93℃、2.00℃和 3.03℃。年降水量变化趋势不明显,基准年多年平均降水量为 435.5mm,21 世纪全流域多年平均降水量除 2020s 较基准年减少 1.7% 外,2050s 和 2080s 均表现为增加趋势,增幅分别为 3.7% 和 8.9%。

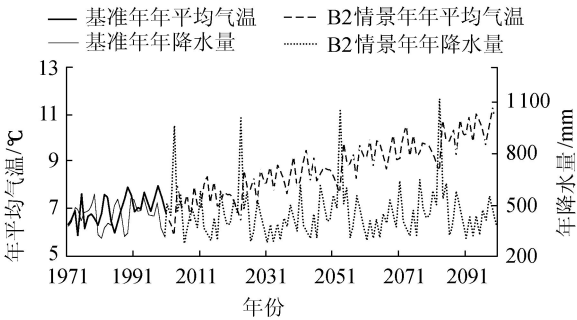


图 1 B2 情景下老哈河流域年平均气温和年降水量变化情况

用 MK 法对各月平均气温和各月降水量进行趋势检验,结果见表 1。从表 1 可看出,未来情景下老哈河流域全年 12 个月的月平均气温 MK 统计量均高于 0.01 的显著性水平临界值,呈显著增加趋势;

夏秋季节平均气温的 MK 统计量高于冬季和春季,说明夏秋季节的增温幅度比冬季和春季的增温幅度大;各月降水量变化有增有减,具体表现为春夏季节降水量减少,秋冬季节降水量增加,各月 MK 统计量均低于 0.1 显著性水平临界值,说明各月降水增加减少幅度不显著。

2 LPJ 模型

LPJ 模型建立在 BIOME 系列模型之上,它从植被动力学出发,联合了机理性的陆地植被动态和碳水循环,研究潜在在自然植被的建立和死亡,然后通过种群统计的方法确定植被的分布和组成,该模拟过程不考虑人类活动影响^[11]。LPJ 模型参数的选择主要以欧洲和美洲相关区域的研究结果为依据,而老哈河流域属于温带半干旱大陆性气候,自然环境比较独特,所以 LPJ 模型直接应用于老哈河流域存在一定适应性问题。为使 LPJ 模型模拟结果更符合流域的植被分布特点,本研究在前人的基础上,参照 TM 遥感数据解译的 2000 年土地覆被数据^[12],对 LPJ 模型参数进行了进一步调整(表 2)。此外,本研究对 LPJ 源代码进行了修改,将气温和降水输入的时间步长调整为 1d,使得实测气候数据在模拟运算过程中无需进行插值,减少了模型运算的不确定性。

表 2 各种功能型植被生态限制条件 ℃

功能型植被	$t_{c,min}$	$t_{c,max}$	$G_{5,min}$
热带常绿阔叶林 (TrBE)	12	—	—
热带阔叶雨林 (TrBR)	12	—	—
温带常绿针叶林 (TeNE)	-2	22	900
温带常绿阔叶林 (TeBE)	0	14	1 200
温带夏绿阔叶林 (TeBS)	-17	5	1 200
寒带常绿针叶林 (BoNE)	—	-12	500
寒带夏绿针叶林 (BoNS)	—	-2	350
寒带夏绿阔叶林 (BoBS)	—	-15	350
温带荒漠灌丛 (TeDZ)	—	-5	350
温带草本 (TeH)	—	-6	—
热带草本 (TrH)	15	—	—
寒性草本 (CoH)	—	-8	—

注: $t_{c,min}$ 为维持植被生存所需要的最冷月平均气温的最小值; $t_{c,max}$ 为植被定居需要的最冷月平均气温的最大值; $G_{5,min}$ 为植被定居所需的高于 5℃ 年积累温度的最小值。

运用 LPJ 模型进行植被动态模拟时,先假设流域地表为裸土^[9],用基准年(1971—2000 年)实测气象数据驱动 LPJ 模型循环运转 1 000 a,直到植被生态系统达到平衡,然后在平衡状态下,采用 1971—2100 年气象数据进行动态模拟,各年代际的模拟结果用各年代际的多年平均值表示。分析模拟结果,需先验证改进的 LPJ 模型参数在老哈河流域的适用性,再将未来情景下的模拟结果与基准年的模拟结果进行对比,以分析气候变化对植被分布、各种功能

型植被覆盖率、叶面积指数(leaf area index,以下简称 LAI)以及流域植被 NPP 分布趋势的影响。

3 气候变化对老哈河流域植被分布的影响

LPJ 模型模拟过程中没有考虑人类活动对植被的直接影响,只能模拟出潜在植被。根据 TM 遥感数据解译的 2000 年土地覆被数据^[12](图 2(b)),老哈河流域受人类活动影响很大,农田基本占据了整个中下游区域,因此不能以各功能型植被的空间绝对分布作为模型验证的依据。本研究选取流域中主要植被的分布趋势作为依据对模型参数进行调整。不考虑农田和水体,对比分析图 2(a)与图 2(b)发现,除流域西南区域落叶阔叶林偏少外,模拟的潜在植被分布趋势与 TM 解译数据反映的流域植被分布趋势基本一致,即流域上游地区主要分布着落叶阔叶林,草本植物主要分布在流域的中下游区域,说明改进后的 LPJ 模型在老哈河流域具有一定的适用性。

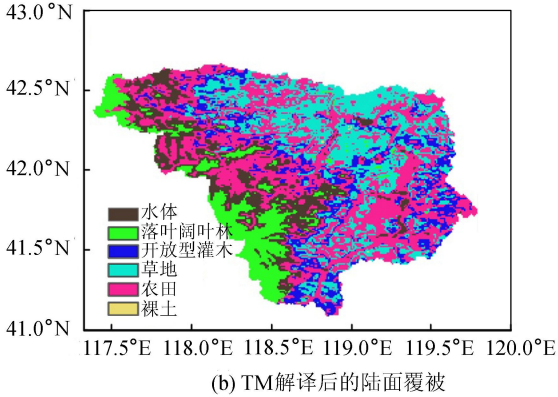
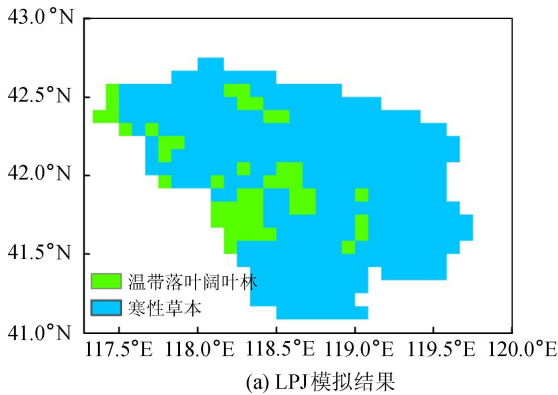


图 2 模拟结果与遥感解译数据对比

根据改进的 LPJ 模型模拟的基准年植被分布结果可知,老哈河流域主要分布着 3 种植被类型,即,温带夏绿阔叶林、温带草本和寒性草本,三者分别占整个流域面积的 14.1%、39.3% 和 42.8%,流域上游还分布着少量的温带荒漠灌丛,约占整个流域的 3.5%(图 3(a))。

通过 LPJ 模型模拟计算,得出老哈河流域各年代际的植被覆盖率,见表 3。随着气温的增加,老哈

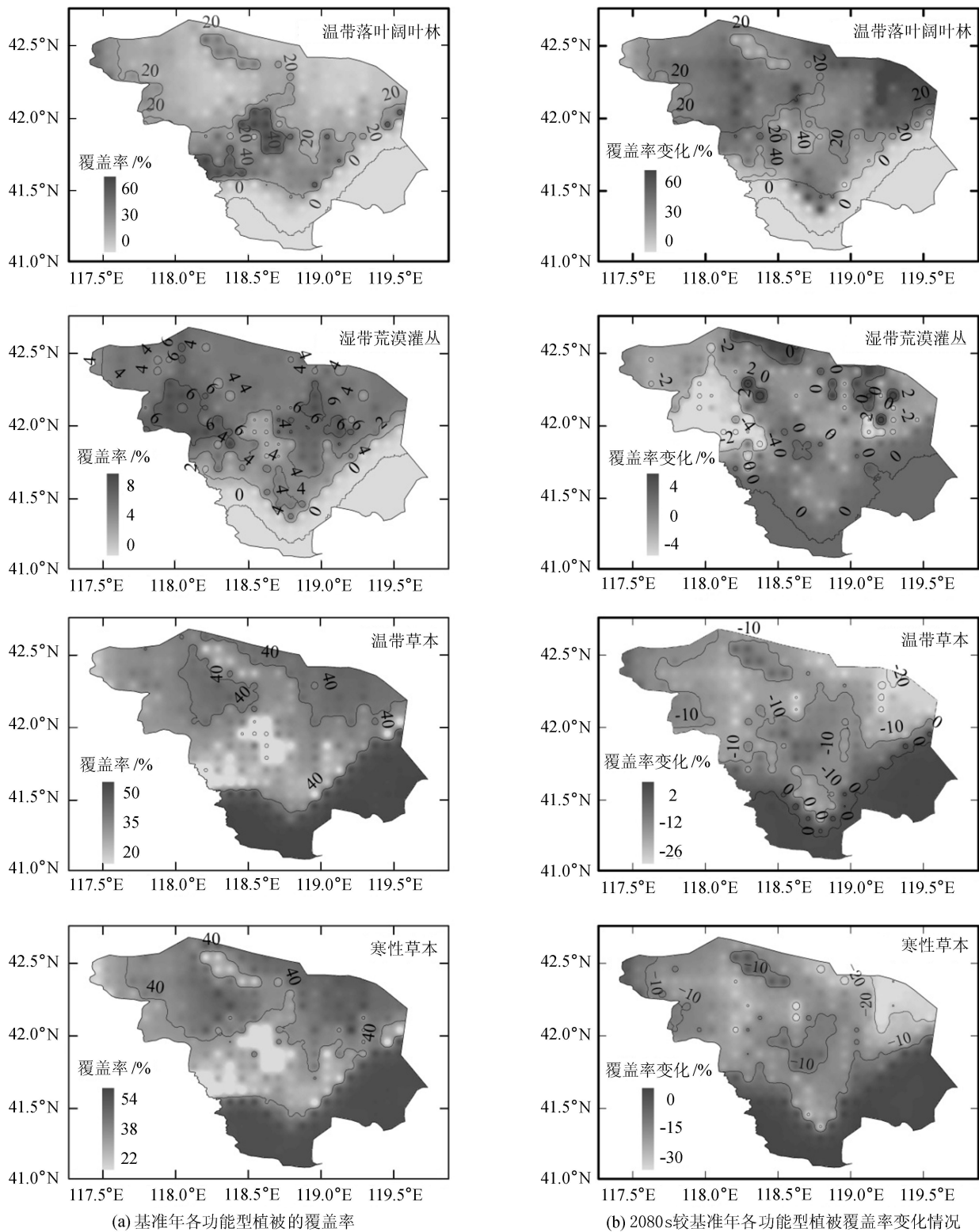


图3 2080s与基准年各功能型植被覆盖率比较

河流域森林覆盖率逐渐增高,到2080s年代际,温带落叶阔叶林的覆盖率较基准年增加了18.6%;草本植被覆盖率逐渐减少,到2080s年代际,温带荒漠灌丛、温带草本和寒性草本覆盖率较基准年分别缩减了0.9%、7.9%和10.1%。各功能型植被空间分布变化情况见图3(b)。从图3(b)可以看出,温带落叶阔叶林呈现向东和向北扩张趋势,其中流域东北

部增加最为显著,覆盖率增加值超过了56%;温带草本和寒性草本则呈现向南缩减趋势,东北部缩减最为明显,说明流域整个中部和北部的草本植被逐步被森林植被演替。另外,灌木的生长呈现整体向南移的趋势。上述表现是由于虽然B2情景下年平均气温和年降水量均有所增加,但在夏秋季节月平均气温升高显著时月降水量却呈现减少趋势。随着

CO₂ 浓度的升高,CO₂ 的施肥效应能够有效地提高植物对土壤水分的利用效率,但在夏季流域气温最高、植物蒸腾需水量最大的时期,降水减少使得土壤水分更为紧缺,于是根系较浅、生长受水分限制较大的草本和灌木在整个植被竞争系统中处于劣势地位,其覆盖率逐渐降低,并逐步被根系深、吸水能力大的林地植被所演替。

表 3 各年代际的各功能型植被覆盖率 %				
年代际	覆盖率			
	TeBS	TeDZ	TeH	CoH
基准年	14.1	3.5	39.3	42.8
2020s	14.7	3.4	39.1	42.5
2050s	21.5	3.4	36.3	38.4
2080s	32.7	2.6	31.4	32.7

植被结构和组成的变化还可以通过 LAI 的变化得以体现。对比分析各年代际月平均 LAI,除 2020s 夏季月 LAI 略低于基准年以外,2050s 和 2080s 多数月份的月平均 LAI 值均高于基准年(图 4),其中 2080s 夏秋季增加最为显著,说明到 2080s 草本植被已经逐渐被落叶型植被所演替,并且随着气温的升高和降水量的增加,落叶型植被的落叶时间延后^[10],秋冬季 LAI 也相应增加。

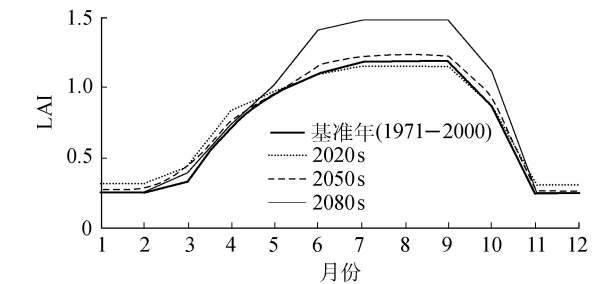


图 4 各年代际月平均 LAI 变化

4 气候变化对老哈河流域植被 NPP 的影响

植被 NPP 是评价陆地生态系统可持续发展的一个重要指标^[9],以生产有机质的多少来表示。受植物本身生物学特性、气候因素、土壤特性和人类活动等的影响,老哈河流域基准年的多年平均 NPP 为 564.5 g/(m²·a),呈现南高北低分布趋势(图 5(a))。其中最高值区出现在流域南部,这里水热条件较好,能够满足植被生长的需求,最低值位于流域中部,多年平均 NPP 低于 500 g/(m²·a)。

随着气温升高和降水量增多,以及 CO₂ 浓度增加,老哈河流域植被 NPP 年总量逐渐上升,其中 2020s、2050s、2080s 的植被 NPP 较基准年分别增加 0.1%、8.1% 和 12.7%。对比老哈河流域 2080s 与基准年植被 NPP 分布情况(图 5)可知,2080s 年代际流域 NPP 空间分布上除了西北部植被 NPP 有较少的减

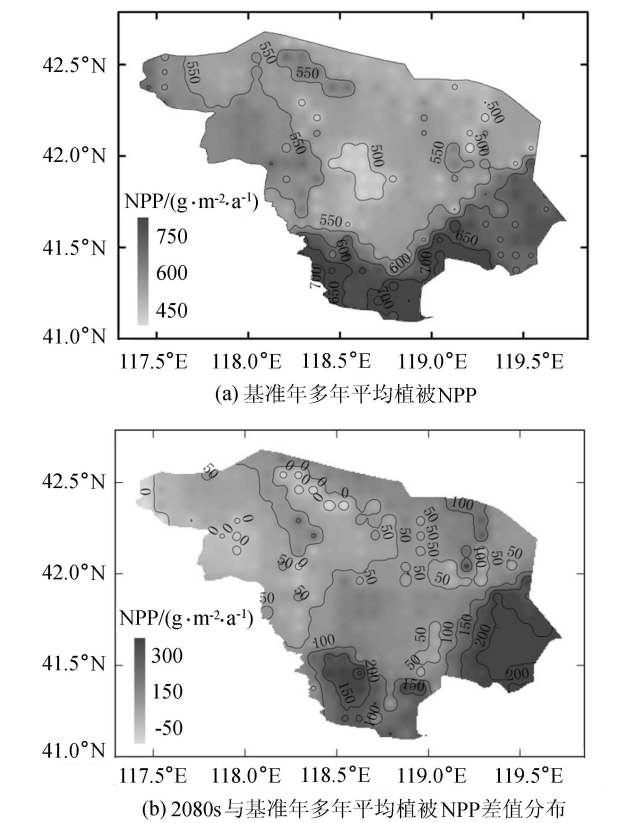


图 5 2080s 与基准年的多年平均植被 NPP 比较

少外,整个流域的植被 NPP 都呈现增长趋势,其中原来植被 NPP 值较高的东南区域增加最多。这是由于温度的升高在一定程度上加速了植物光合作用效率,增强了植物养分的供应,使得植物生产能力提升;再者该区域主要植被类型是草本和灌木,植被生长的主要限制因子是水分,2080s 年代际降水量的增加使得植被 NPP 大范围增加。

5 结 语

本研究根据老哈河流域地理气候特征对 LPJ 模型参数进行了修正,并以 B2 气候情景数据为输入数据,模拟了老哈河流域 1971—2100 年潜在植被的生长变化情况。结果显示,受气候变化影响,老哈河流域温带夏绿阔叶林覆盖率显著增加,且呈现向东部和北部扩张趋势,草本植被覆盖率则逐渐向南缩减;各月平均 LAI 除 2020s 夏季略低于基准年,其他年代际年内大部分月份的月平均 LAI 均较基准年高,且夏季增幅最大;流域植被 NPP 南高北低的空间分布格局基本不变,但年总量呈增加趋势,到 2080s,除西北区域植被 NPP 较基准年略有减少外,流域各区域的植被 NPP 均有所增长,其中原本植被 NPP 值较高的东南区域增加幅度最大。

潜在植被的分布和演替受多种因素的影响,本研究较合理地模拟了老哈河流域潜在植被的分布和动态变化情况,但模拟过程只考虑了气候的变化,在今

后的研究中,需进一步研究区域气候环境和人类活动对植被的综合影响。另外,作为评估长时间序列尺度下气候变化对水资源影响的重要因素,模拟的潜在植被动态变化过程将被引入水文模型,以模拟水文过程对气候变化的响应,进而预测未来全球气候变化情景下的水资源空间格局变化。

参考文献:

[1] SOLOMON S. Climate change 2007: the physical science basis working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 刘晓帆,任立良,袁飞. 老哈河流域 NDVI 动态变化及其与其后因子的关系 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38 (1): 1-5. (LIU Xiaofan, REN Liliang, YUAN Fei, et al. Dynamic variation of DNVI in Laoha River Basin and its relationship with climate factors [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38 (1): 1-5. (in Chinese))

[3] 刘华民,吴绍洪,郑度,等. 潜在自然植被研究与展望 [J]. 地理科学进展, 2004, 23 (1): 62-70. (LIU Huamin, WU Shaohong, ZHENG Du, et al. The study on the potential natural vegetation and future prospect [J]. Progress in Geography, 2004, 23 (1): 62-70. (in Chinese))

[4] 赵东升,吴绍洪,尹云鹤. 气候变化情景下中国自然植被净初级生产力分布 [J]. 应用生态学报, 2011, 22 (4): 897-904. (ZHAO Dongsheng, WU Shaohong, YIN Yunhe. Variation trends of natural vegetation net primary productivity in China under climate change scenario [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22 (4): 897-904. (in Chinese))

[5] NI J, SANDY P H, PRENTICE I C, et al. Impact of climate variability on present and holocene vegetation: a model-based study [J]. Ecological Modeling, 2005, 191 (3/4): 1-18.

[6] YUAN Fei, REN Liliang, YU Zhongbo, et al. Potential natural vegetation dynamics driven by future long-term climate change and its hydrological impacts in the Hanjiang River basin, China [J]. Hydrology Research, 2011, 43 (1-2): 73-90.

[7] 袁飞,任立良. 环境变化与水文过程模拟 [M]. 南京: 河海大学出版社, 2012.

[8] 孙艳玲,延晓冬,谢德体,等. 应用动态植被模型 LPJ 模拟中国植被变化研究 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29 (11): 86-91. (SUN Yanling, YAN Xiaodong, XIE Deti, et al. Application of LPJ model in simulating vegetation distribution of China [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29 (11): 86-91. (in Chinese))

[9] 江善虎,任立良,雍斌,等. 老哈河流域降水变化特征分析 [J]. 水电能源科学, 2009, 27 (1): 1-4. (JIANG Shanhu,

REN Liliang, YONG Bin, et al. Analysis of precipitation change in characteristic Laoha River Basin [J]. Water Research and Power, 2009, 27 (1): 1-4. (in Chinese))

[10] 方秀琴,任立良,李琼芳. 老哈河流域水文要素变化研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2009, 37 (6): 620-624. (FANG Xiuqin, REN Liliang, LI Qiongfang. Variation of hydrological elements in Laoha River Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37 (6): 620-624. (in Chinese))

[11] SITCH S, SMITH B, PRENTICE I C, et al. Valuation of ecosystem dynamics, plant geography, and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic vegetation model [J]. Global Change Biology, 2003, 9: 161-185.

[12] 方秀琴. 基于流域空间信息的土地利用变化的水文响应 [D]. 南京: 河海大学, 2010.

(收稿日期: 2013 - 03 - 18 编辑: 彭桃英)

+++++

(上接第 18 页)

[2] 任志远. 北京市平原区地下水资源研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[3] 林健. 北京市城近郊区地下水污染演变分析研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[4] 林沛. 北京市城近郊区地下水水质评价与趋势分析 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[5] 费宇红, 张兆吉, 宋海波, 等. 华北平原地下咸水垂向变化及机理探讨 [J]. 水资源保护, 2009, 25 (6): 21-23. (FEI Yuhong, ZHANG Zhaoji, SONG Haibo, et al. Discussion of vertical variations of saline groundwater and mechanism in North China Plain [J]. Water Resources Protection, 2009, 25 (6): 21-23. (in Chinese))

[6] 张建中, 刘庆胜. 地下水水质恶化成因分析及对策 [J]. 科技情报开发与经济, 2005, 15 (14): 72-73. (ZHANG Jianzhong, LIU Qingsheng. The analysis of the cause of and countermeasures for the worsening of groundwater quality [J]. Sci/tech Information Development & Economy, 2005, 15 (14): 72-73. (in Chinese))

[7] 殷勇. 城市地下水开发引起的环境地质问题刍议 [J]. 地下水, 2009, 31 (6): 134-136. (YIN Yong. Primary opinion on environmental geological problems caused by groundwater exploitation in the urban [J]. Ground Water, 2009, 31 (6): 134-136. (in Chinese))

[8] 冯娟. 开采条件下德州地区地下水水质演化研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.

[9] 杜涛. 南水北调入京后北京西南地区地下水水质演变的实验模拟研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2004.

[10] 朱树亮. 论过量开采地下水造成的危害及应采取的保护措施 [J]. 黑龙江水利科技, 2004 (2): 100-101. (ZHU Shuliang. A study on the damage caused by excessive groundwater exploitation and protection measures [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2004 (2): 100-101. (in Chinese))

(收稿日期: 2012 - 08 - 13 编辑: 高渭文)