

东北地区产水量时空分布格局及其驱动因素

吴 健^{1,2,3} 李英花^{1,2,3} 黄利亚⁴ 卢正茂⁵ 于大炮^{1,3} 周 莉^{1,3} 代力民^{1,3*}

(¹中国科学院森林与管理重点实验室(沈阳应用生态研究所), 沈阳 110161; ²中国科学院大学, 北京 100049; ³吉林长白山西坡森林生态系统定位观测研究站, 吉林抚松 134506; ⁴吉林省长白山科学研究院, 吉林安图 133613; ⁵辽宁省森林经营研究所, 辽宁丹东 118002)

摘 要 近 20 年来, 东北地区土地利用空间格局变化显著, 且该区域处于我国最高纬度地区, 是全球气候变化最敏感的区域之一, 因此研究气候和土地利用变化对该区域水资源的影响, 有助于该区域水资源的可持续管理。本研究基于 1990 年、2000 年和 2010 年土地利用、气象和土壤数据, 结合 InVEST 模型, 研究近 20 年来东北地区产水量时空分布格局, 并采用结构方程模型分析气候、土地利用变化对东北地区产水量的影响。结果表明, 在 1990—2010 年间, 中国东北地区产水量先降低后增加; 空间尺度上, 辽东山区、长白山区产水量较高、中部平原区产水量较低, 而大、小兴安岭产水量则介于二者之间; 结构方程模型分析表明, 降水是导致东北地区产水量时空变化的主要因素, 而温度和土地利用变化对研究区产水量的影响较小。

关键词 土地利用变化; 气候变化; InVEST 模型; 产水量

Spatiotemporal variation of water yield and its driving factors in Northeast China. WU Jian^{1,2,3}, LI Ying-hua^{1,2,3}, Huang Li-ya⁴, LU Zheng-mao⁵, YU Da-pao^{1,3}, ZHOU Li^{1,3}, DAI Li-min^{1,3*} (¹Key Laboratory of Forest Ecology and Management, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110161, China; ²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Forest Ecosystem Research Station, Changbai Mountain Western Slope, Fusong 134506, Jilin, China; ⁴Changbai Mountain Academy of Science, Antu 133613, Jilin, China; ⁵Liaoning Institute of Forest Management, Dandong 118002, Liaoning, China).

Abstract: Land use change across Northeast China experienced a significant spatiotemporal variation between 1990 and 2010. Northeast China is one of the most sensitive regions to global climate change. A better understanding of the effects of land use change and climate change on water yield is of great importance to water resource planning and sustainable management. Based on the land use data in 1990, 2000, and 2010, meteorological data, and soil data, InVEST model was used to analyze the spatiotemporal changes in water yield in Northeast China from 1990 to 2010. Structural equations were used to explore the influence of climate change and land use change on water yield in Northeast China. The results showed that the water yield in Northeast China had a trend of increase after an initial decrease in the 20 years. In addition, montane regions of Eastern Liaoning Province and Changbai Mountain area had the highest water yield, while the plain area had the least water yield. The precipitation was estimated to be the main factor leading to the spatiotemporal variation of water yield in Northeast China, while temperature and land use change had a minor influence on water yield.

Key words: land use change; climatic change; InVEST model; water yield.

水资源是人类社会赖以生存和发展不可替代的资源, 是人类社会可持续发展的基本条件之一。随着人口不断增长和社会经济发展, 水资源短缺已成

为全球性问题(刘佳骏等, 2011)。中国东北地区是松花江、图们江、鸭绿江、辽河等主要河流的发源地, 淡水资源丰富, 但同时也是我国重要的商品粮生产基地。随着近年来区域农业的快速发展, 导致东北地区面临着巨大的水资源压力。已有研究表明, 气候

中国科学院重点部署项目(KFZD-SW-305-001)资助。

收稿日期: 2017-07-25 接受日期: 2017-08-29

* 通讯作者 E-mail: lmdai@iae.ac.cn

及土地利用变化是影响区域产水量的主要因素(Forrer *et al.*, 2001; McCarthy, 2001; Huang *et al.*, 2004; Brown *et al.*, 2005)。中国东北地区 20 世纪后期以来,随着工业化、城市化快速发展,以及区域生态工程保护战略的实施,导致该区域土地利用空间格局发生了显著变化;且东北地区地处中高纬度及欧亚大陆东端,在全球气候变化中具有较强的敏感性(赵秀兰, 2010)。因此,有必要明确气候和土地利用变化对该区域水资源的影响,以便于对该区域水资源的可持续管理提供理论基础。

目前,生态系统产水量的研究方法主要有土壤蓄水能力法、水量平衡法、年径流法等(张彪等, 2009),其中,水量平衡法是评估生态系统产水量最有效且最常用的方法(Chen *et al.*, 2011)。由美国斯坦福大学、大自然保护协会(TNC)和世界自然基金会(WWF)合作联合开发的 InVEST(The Integrate Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs Tool)模型产水模块以水量平衡法原理为基础,在遥感、地信等相关学科的支持下对研究区产水量进行评估;该模型不仅可以量化研究区产水量,而且可以对研究区产水量的空间异质性和时间动态性进行表达。截至目前,InVEST 模型因其具有较强的空间表达和动态评估能力、模型数据需求简单、输出数据量大及可扩展性强等优点在中美洲的哥伦比亚、非洲的坦桑尼亚(Fisher *et al.*, 2011)、西非的加纳和科特迪瓦(Leh *et al.*, 2013)、亚洲的印度尼西亚及中国的部分

地区(Su *et al.*, 2013; 付梦娣等, 2016)均有实际应用,并取得较好的应用效果,是当前区域决策制定和资源管理的重要手段。

本文以中国东北作为研究区,利用 InVEST 产水模块对研究区 1990、2000、2010 年产水量进行评估,其目的在于:(1)确定中国东北地区产水量的时空变化;(2)揭示气候(温度、降水)和土地利用变化对中国东北地区产水量的影响。

1 材料与方法

1.1 研究区域

中国东北地区地处 $118^{\circ}50'E-135^{\circ}05'E$, $38^{\circ}43'N-53^{\circ}23'N$ 。行政上包括辽宁、吉林、黑龙江三省及内蒙古东四盟地区(图 1),南北距离 1600 多 km,东西距离 1400 多 km,土地面积约 124.14 万 km^2 ,约占我国国土总面积的 12.94%(王绍强等, 2001)。该区域受高纬度东亚季风影响,从南到北依次为暖温带、温带和寒温带,年平均温度从 $-4\sim 11.5^{\circ}C$;从东到西依次为湿润、半湿润和半干旱气候,年平均降水量从 250~1100 mm(Tan *et al.*, 2007)。东北地区总体地貌是北高南低,山地主要分布在东部和北部,西部与南部为丘陵和平原,其中长白山、大小兴安岭作为东北生态系统的重要天然屏障,是松花江、辽河、鸭绿江等主要河流的发源地。

1.2 研究方法与数据来源

1.2.1 研究方法 InVEST 产水量模型以 Budyko

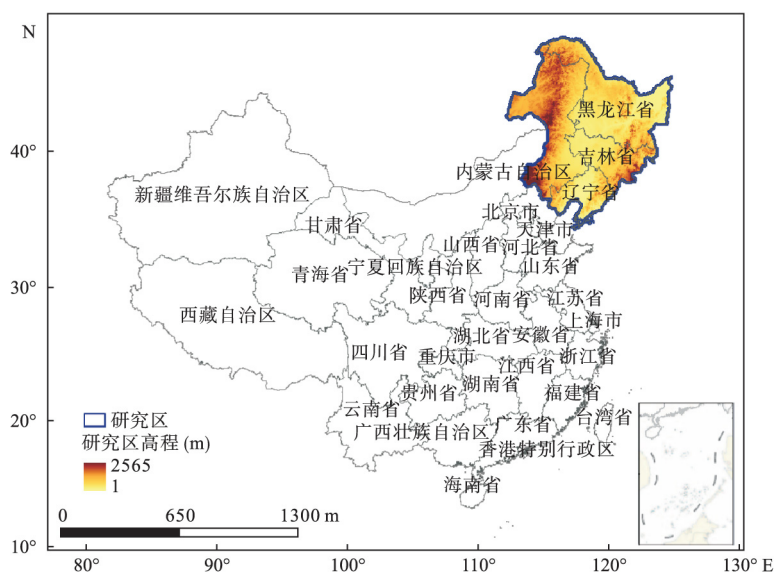


图 1 研究区地理位置示意图

Fig.1 Location of the study area

曲线和年降水量为基础 (Budyko, 1974), 根据水循环原理, 运用水量平衡法通过降水、植物蒸腾、地表蒸发等参数计算获得产水量, 公式如下:

$$Y_x = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \quad (1)$$

式中: $Y(x)$ 为单元格 x 上的年产水量 (mm); $AET(x)$ 为单元格 x 上的年实际蒸散发量 (mm); $P(x)$ 为单元格上的年降水量 (mm)。

实际蒸散量与降水比值根据 Zhang 等 (2001) 在 Budyko 曲线的基础上发展而来, 公式如下:

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^\omega\right]^{1/\omega} \quad (2)$$

式中: $PET(x)$ 为潜在蒸散发量 (mm); ω 为非物理参数, 与区域自然气候、土壤属性有关。其中 $PET(x)$ 根据公式 3 计算, ω 根据公式 (4) 计算。

$$PET(x) = K_c(l_x) \cdot ET_{0(x)} \quad (3)$$

式中: $ET_{0(x)}$ 为单元格 x 上的参考蒸散发量, 反映区域的气候条件; $K_c(l_x)$ 为单元格 x 上植被蒸散系数, 与土地利用类型有关。

$$\omega(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1.25 \quad (4)$$

式中: $AWC(x)$ 为栅格 x 上的植物可利用含水量 (mm), 与土壤质地和有效根长有关; Z 为经验常量, 反映区域的降水模式和水文特性并与每年的降水次数呈正相关。

1.2.2 数据来源 InVEST 模型所需数据包括土地利用与覆盖 (LULC)、降水 (P)、参考作物蒸散发 (ET_0)、土壤深度、根系深度、植被有效含水量 ($PAWC$)、植被蒸散系数、 Z 参数。

本研究使用的东北地区 1990、2000 和 2010 年的土地利用与覆盖数据及 DEM 数据来自中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 空间分辨率为 1 km。研究区共涉及林地、灌木林地、草地、耕地、水体、建设用地及未利用地 7 种土地利用类型。

降水数据来自于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn>) 通过东北地区及周边 128 个气象站的降水数据插值获得研究区 1990、2000、2010 年降水量空间分布数据; 年参考蒸散发 (ET_0) 利用 FAO56 修正的 Penman-Monteith 方程来计算, 其中辐射校正项参考 Yin 等 (2008) 的结果。

土壤深度数据来自于全国第二次土壤普查数据集; 根系深度数据参考相关文献 (Canadell *et al.*,

1996; Schenk *et al.*, 2002); 植被有效含水量运用周文佐 (2003) 等提出的非线性拟合土壤 AWC 估算模型对植被可利用水能力进行估算, 该方法所需要的土壤质地数据来自于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>), 土壤有机质含量数据来自于全国第二次土壤普查数据集。

非植被覆盖区域及灌木林的蒸散系数依据 InVEST 模型提供的参考数据, 农作物蒸散系数参考自然资本项目提供的数据 (http://data.naturalcapitalproject.org/invest-data/Kc_calculate_or.xlsx), 林地与草地的蒸散系数由叶面积指数计算, 其中叶面积指数参考相关文献 (黄玫等, 2010; 柳艺博等, 2012); Z 参数表征区域降水模式和水文特征的常数, 根据公式 5 计算得出, 该方法所需的 ω 值参考相关文献 (Xu *et al.*, 2013)。

$$Z = \frac{(\omega - 1.25) \times P}{AWC} \quad (5)$$

其中 P 为研究区年平均降水量, 单位 (mm); AWC 为植物可利用水含量, 单位 (mm); ω 为经验参数, 表征研究区的自然气候、土壤属性。

1.3 数据处理

本文以流域为统计单元, 在 R3.2.4 (R Development Core Team, 2016) 的环境下利用 Pearson 相关分析法对影响要素 (气候、土地利用变化) 与研究区产水量间的相关性进行分析, 在此基础上利用结构方程模型 (Fox, 2006) 分析多种影响要素间的因果关系及其对研究区产水量的直接效应与间接效应。

2 结果与分析

2.1 东北地区产水量时空动态分析

东北地区 3 个年份 (1990、2000、2010 年) 产水量空间分布模式均表现为辽东山区、长白山区产水量较高、中部平原区产水量较低, 而大、小兴安岭产水量则介于二者之间。研究区平均产水量从 1990 年的 $2083.815 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 下降到 2000 年的 $1429.665 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均每公顷产水量下降 654.15 t , 而与 2000 年相比, 2010 年研究区产水量得到明显提升, 平均每公顷产水量增加 953.605 t , 达到 $2383.27 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 1990—2010 年间, 产水量增加的区域主要分布在辽东山区, 除此之外, 大、小兴安岭及长白山部分地区产水量也存在一定程度的增加, 占研究区总面积的 50.07% (图 2)。从空间来看, 研究区产水量的空间差异有随时间变化逐渐增加的趋势 ($CV_{1990} =$

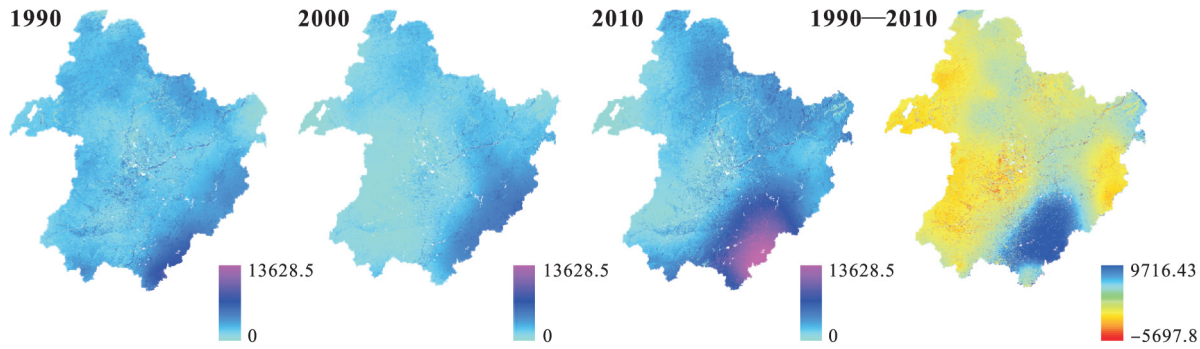


图2 东北地区产水量($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)
Fig.2 Water yield of the Northeast China

$55.08\% < CV_{2000} = 81.88\% < CV_{2010} = 88.41\%$)。

2.2 温度、降水与东北地区产水量相关性分析

全球气候变化背景下,东北地区气候也存在一定程度的变化,因此本研究采用 Pearson 相关分析法对研究区温度、降水与产水量间的关系进行分析。结果表明,降水量与 1990、2000 和 2010 年产水量均存在极显著的正相关关系;而年平均温度、年平均最高温度仅与 1990 年和 2010 年的产水量呈显著的正相关关系,年平均最低温度则只与 2010 年的产水量呈显著的正相关关系。1990—2000、2000—2010 及 1990—2010 年间产水量的变化一方面与年平均最高温度的变化呈现出极显著的负相关关系,另一方面与降水量的变化呈现出极显著的正相关关系(表 1)。

2.3 土地利用/覆盖与东北地区产水量相关性分析

1990—2010 年间,东北森林、草地、水体及未利用地面积呈下降趋势,但 2000—2010 年间的变化速率明显低于 1990—2000 年间的变化速率;灌木林地、农田及建设用地面积呈上升趋势,除建设用地的变化速率基本保持恒定外,灌木林地、农田在 2000—2010 年间的变化速率明显低于 1990—2000 年间的变化速率(图 3)。

对东北地区土地利用/覆盖与产水量进行相关性分析,结果表明,在 1990、2000、2010 年这 3 个年份

中,产水量与森林覆盖百分率均存在显著的正相关关系,而与未利用地覆盖率均呈显著的负相关关系;但 1990—2000、2000—2010 及 1990—2010 年间产水量变化与这 3 个时间段内土地利用/覆盖变化均无显著的相关关系。由此看出,东北地区产水量主要分布在森林覆盖率较高而未利用地覆盖率较低的区域。但在时间尺度上,东北地区土地利用/覆盖的变化并未导致产水量在时间上的变化(表 2)。

2.4 气候、土地利用变化与东北地区产水量结构方程模型分析

利用结构方程模型分析了降水、年平均最高温度、森林覆盖率及未利用地覆盖率间的因果关系及其对研究区产水量的直接效应与间接效应。结果表明,除降水对研究区 1990、2000、2010 年产水量的直接效应较大外,其他因素(年平均最高温度、森林覆盖率、未利用地覆盖率)对研究区产水量的直接效应均较小,且多为不显著(表 3)。从结构方程模型图可以看出(图 4),研究区降水量与森林覆盖率之间存在较强的正效应($DF_{1990} = 0.72$, $DF_{2000} = 0.68$, $DF_{2010} = 0.64$);而与未利用地覆盖率之间则存在较强的负效应($DF_{1990} = -0.47$, $DF_{2000} = -0.40$, $DF_{2010} = -0.41$);不仅如此,研究区降水量与年平均最高温度间存在复杂的相互作用($IR_{1990} = 0.36$, $IR_{2000} = 0.04$, $IR_{2010} = 0.46$),且该相互作用在不同年份间变化较大。

表 1 气候因子与当年产水量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between the climatic factor and water yield in the same years

气候因子	产水量					
	1990	2000	2010	1990—2000	2000—2010	1990—2010
降水	0.845**	0.935**	0.961**	0.932**	0.974**	0.968**
年平均温度	0.190*	-0.033	0.393**	-0.496**	-0.221*	-0.053
年平均最高温度	0.248**	-0.007	0.389**	-0.509**	-0.483**	-0.298**
年平均最低温度	0.175	-0.009	0.411**	-0.307**	0.071	0.111**

** 相关性在 0.01 的水平上显著(双尾检验);* 相关性在 0.05 的水平上显著(双尾检验)。

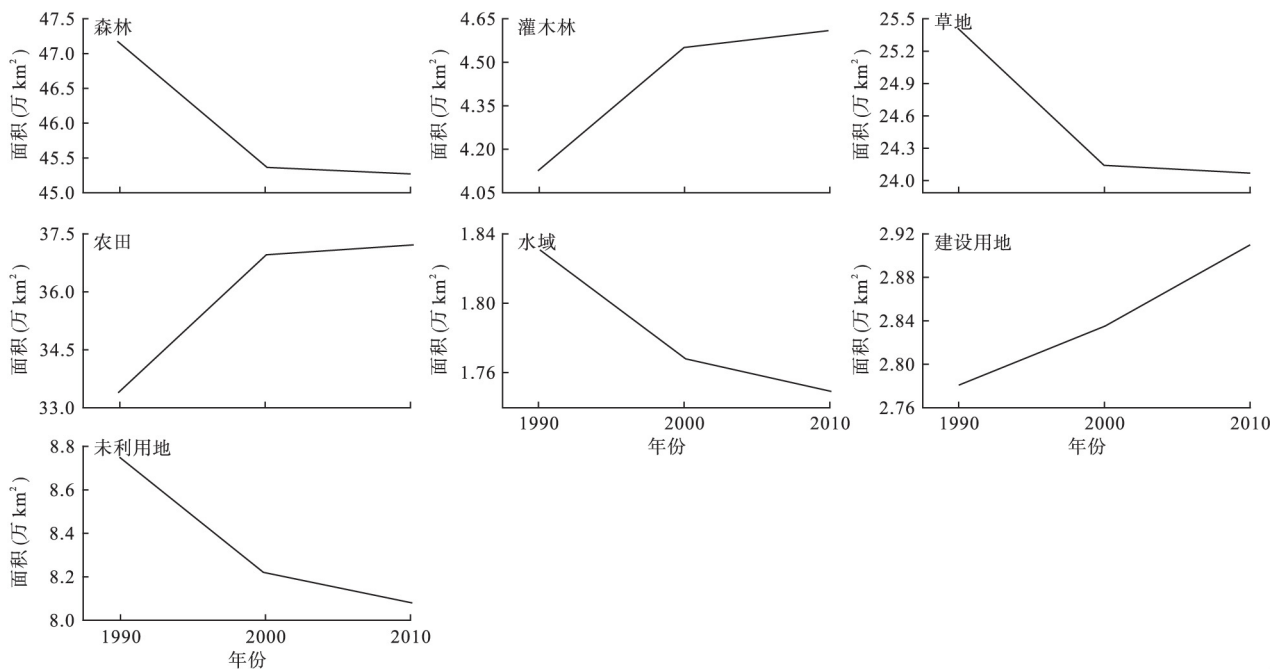


图 3 1990—2010 年东北地区土地利用变化模式
Fig.3 Land use change in the Northeast China from 1990 to 2010

表 2 土地利用/覆盖与当年产水量的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between land use change and water yield in the same years

土地利用/覆盖	产水量					
	1990	2000	2010	2000—1990	2010—2000	2010—1990
森林覆盖率	0.578**	0.703**	0.423**	0.056	0.132	0.029
灌木林地覆盖率	0.025**	-0.048	-0.045	-0.070	-0.098	-0.148
草地覆盖率	-0.262	-0.480**	-0.518**	0.016	-0.096	0.012
农田覆盖率	-0.221**	-0.183	0.109	-0.111	0.009	-0.003
水域覆盖率	-0.269	-0.200*	-0.165	0.058	-0.025	-0.020
未利用地覆盖率	-0.496*	-0.436**	-0.357**	0.101	0.006	-0.037
建设用地覆盖率	-0.029**	-0.0427	0.278**	-0.104	0.090	0.127

** 相关性在 0.01 的水平上显著(双尾检验); * 相关性在 0.05 的水平上显著(双尾检验)。

表 3 结构方程模型统计结果
Table 3 Structural equation modeling statistics results

时间	影响因素 (F)	直接效应 (DF)	间接效应 (IF)	总效应 (TF)
1990	降水	0.716**	0.154**	0.870**
	年平均最高温度	0.034	-0.102*	-0.069
	森林覆盖率	0.093	0	0.093
	未利用地覆盖率	-0.184**	0	-0.184**
2000	降水	0.845**	0.092**	0.937**
	年平均最高温度	-0.006	-0.037*	-0.042
	森林覆盖率	0.117*	0	0.117*
	未利用地覆盖率	-0.030	0	-0.030
2010	降水	0.974**	0.019**	0.992**
	年平均最高温度	-0.057	-0.011	-0.067*
	森林覆盖率	-0.035	0	-0.035
	未利用地覆盖率	-0.099**	0	-0.099**

** 表示效应在 0.01 的水平上显著; * 表示效应在 0.05 的水平上显著。

3 讨论

3.1 气候变化对研究区产水量的影响

1990—2010 年期间,东北地区降水量先下降后增加(降水₁₉₉₀ = 579.42 mm; 降水₂₀₀₀ = 432.26 mm; 降水₂₀₁₀ = 563.46 mm),与产水量的总体时间变化趋势基本一致,这说明降水量可以直接影响研究区产水量的大小。本文对研究区降水量、温度(年平均温度、年平均最高温度、年平均最低温度)与产水量间的关系进行相关分析及结构方程模型分解,结果表明,降水量对研究区产水量的总效应较大($TF_{1990} = 0.870$, $TF_{2000} = 0.937$, $TF_{2010} = 0.992$),该结果与一些研究中的相关分析结果相似(McFarlane *et al.*, 2012; Suetal., 2013);年平均最高温度虽然对研究

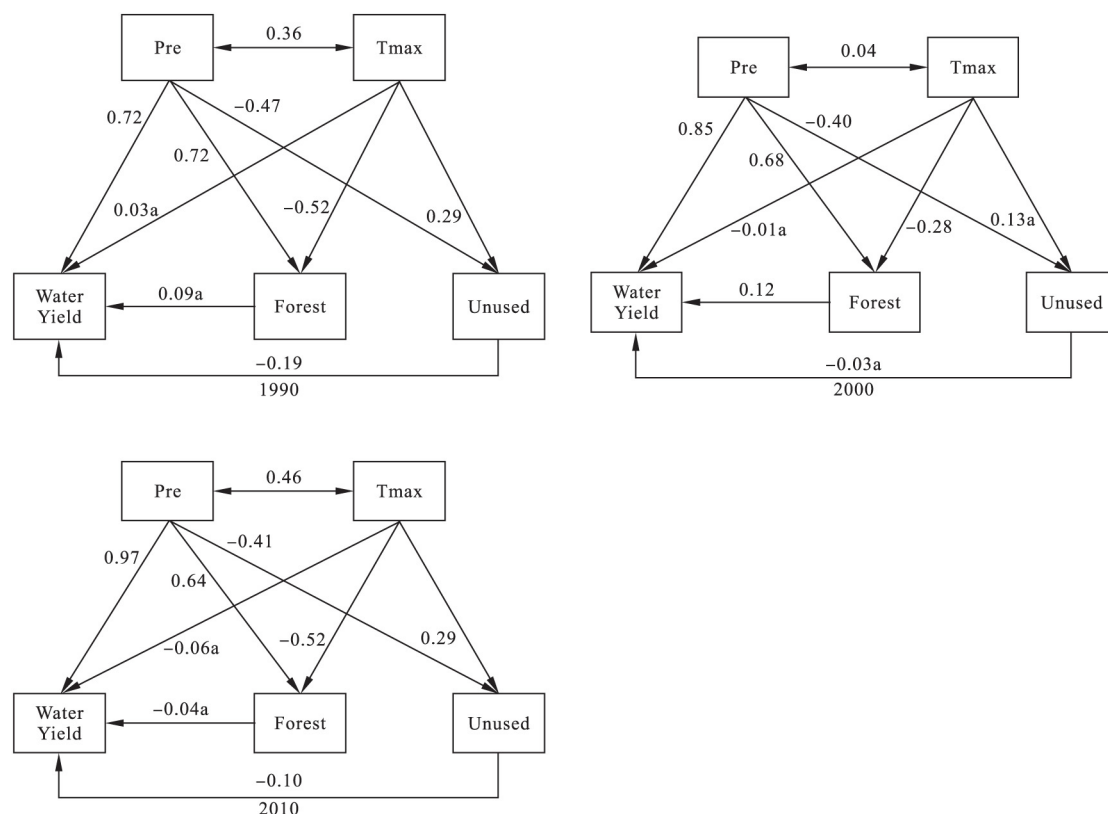


图4 气候及土地利用变化对研究区产水量影响的结构方程模型

Fig.4 Structural equation modeling illustrating the effects of land use change and climate on water yield

Pre 表示降水, Tmax 表示年平均最高温度, Unused 表示未利用地覆盖率, Forest 表示森林覆盖率, Water Yield 表示产水量; 右侧标注 a 的路径系数表示效应不显著。

区产水量具有一定的负效应 ($TF_{1990} = -0.069$, $TF_{2000} = -0.042$, $TF_{2010} = -0.067$) ,但总效应值较小,且效应多为不显著。而 Tang 等 (2012) 和 Su 等 (2013) 的研究表明,温度与产水量间存在显著的负相关关系,与本研究结构方程分析结果存在一定的差异,主要是由于相关分析未考虑降水与年平均最高温度间的相互作用,因此导致结构方程与相关分析的结果间存在一定差异。因此,东北地区降水量对该区域产水量具有显著正效应;而年平均最高温度对研究区产水量具有一定的负效应,但总效应值较小,且效应多为不显著,其与产水量间显著的相关关系主要归因于降水量与温度间存在复杂的耦合关系。

3.2 土地利用变化对研究区产水量的影响

土地利用变化影响陆面的实际蒸散发、土壤理化性质和水分状况,进而影响研究区产水量。本研究中森林覆盖率与研究区产水量间存在显著的正相关关系 ($r_{1990} = 0.578$, $r_{2000} = 0.703$, $r_{2010} = 0.423$) ,表明森林覆盖区域提供了较高的产水量 (Martinez *et al.*, 2009; Bai *et al.*, 2011; Leh *et al.*, 2013) 。在此基础上利用结构方程模型进一步对森林覆盖率与产水量间

的关系进行分析,结果表明,降水量对森林覆盖率的直接效应 ($DF_{1990} = 0.72$, $TF_{2000} = 0.68$, $TF_{2010} = 0.64$) 较高,而森林覆盖率对产水量的直接效应较低 ($DF_{1990} = 0.093$, $TF_{2000} = 0.117$, $TF_{2010} = -0.035$) 且多为不显著。由此看出,森林覆盖区域产水量较高主要是由于研究区气候状况决定该区域的土地利用类型,而东北地区森林主要分布在降水量较高的区域。

3.3 结果不确定性分析

利用 InVEST 模型评价研究区产水量存在一定程度的不确定性,主要是由于 InVEST 模型没有考虑复杂地形、消费需求及地上水与地下水相互作用对产水量的影响 (Sharp *et al.*, 2016) 。因此,截至目前 InVEST 模型产水模块主要用于探测研究区产水量关键区域、基于相对值揭示研究区产水量的时空变化及其驱动因素,而不是精确计算研究区产水量的绝对价值。不仅如此,土地利用与覆盖数据也存在一定程度的不确定性,而且研究区域越大,其不确定性越高。研究结果虽存在上述的一系列不确定性,但本研究在 1990、2000 及 2010 年的模型估算中采用同一套数据源及相同数据处理方法,以保证其具有

相同的系统误差。在此基础上,基于相对值来探讨研究区产水量的时空模式及其驱动因素,结果具有科学性及合理性。

4 结 论

利用 InVEST 模型对中国东北地区 1990、2000 及 2010 年产水量进行评估,结果表明:中国东北地区产水量先降低后增加(产水量₁₉₉₀ = 2083.815 t · hm⁻²,产水量₂₀₀₀ = 1429.665 t · hm⁻²,产水量₂₀₁₀ = 2383.27 t · hm⁻²);空间尺度上,辽东山区、长白山区产水量较高、中部平原区产水量较低,而大、小兴安岭产水量则介于二者之间,且产水量空间差异有随时间逐渐增加的趋势。

降水量是导致东北地区产水量时空变化的主要因素。年平均最高温度、森林覆盖率及未利用地覆盖率虽然与研究区产水量均存在显著的相关关系,但对上述影响因子进行结构方程模型分解表明年平均最高温度、森林覆盖率及未利用地覆盖率对研究区产水量的总效应较小且多为不显著,其与产水量较强的相关性主要归因于上述因子与降水量间存在较强的耦合关系。

参考文献

- 付梦娣,李俊生,章荣安,等. 2016. 浙江省南部山区生态系统服务价值评估. 生态经济, **32**(4): 189–193, 198.
- 黄 玫,季劲劭. 2010. 中国区域植被叶面积指数时空分布——机理模型模拟与遥感反演比较. 生态学报, **30**(11): 3057–3064.
- 刘佳骏,董锁成,李泽红. 2011. 中国水资源承载力综合评价研究. 自然资源学报, **26**(2): 258–269.
- 柳艺博,居为民,陈镜明,等. 2012. 2000—2010 年中国森林叶面积指数时空变化特征. 科学通报, **57**(16): 1435–1445.
- 王绍强,周成虎,刘纪远,等. 2001. 东北地区陆地碳循环平衡模拟分析. 地理学报, **56**(4): 390–400.
- 张 彪,李文华,谢高地,等. 2009. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学杂志, **28**(3): 529–534.
- 赵秀兰. 2010. 近 50 年中国东北地区气候变化对农业的影响. 东北农业大学学报, **41**(9): 144–149.
- 周文佐,刘高焕,潘剑君. 2003. 土壤有效含水量的经验估算研究——以东北黑土为例. 干旱区资源与环境, **17**(4): 88–95.
- Bai Y, Zhuang CW, Ouyang ZY, et al. 2011. Spatial characteristics between biodiversity and ecosystem services in a human-dominated watershed. *Ecological Complexity*, **8**: 177–183.
- Brown AE, Zhang L, McMahon TA, et al. 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, **310**: 28–61.
- Budyko MI. 1974. *Climate and Life*. New York: Academic Press.
- Canadell J, Jackson RB, Ehleringer JR, et al. 1996. Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, **108**: 583–595.
- Chen L, Xie GD, Zhang CS, et al. 2011. Modelling ecosystem water supply services across the Lancang River Basin. *Journal of Resources and Ecology*, **2**: 322–327.
- Fisher B, Turner RK, Burgess ND, et al. 2011. Measuring, modeling and mapping ecosystem services in the Eastern Arc Mountains of Tanzania. *Progress in Physical Geography*, **35**: 595–611.
- Fohrer N, Haverkamp S, Eckhardt K, et al. 2001. Hydrologic response to land use changes on the catchment scale. *Physics and Chemistry of the Earth Part B: Hydrology Oceans and Atmosphere*, **26**: 577–582.
- Fox J. 2006. Structural equation modeling with the sem package in R. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, **13**: 465–486.
- Huang MB, Zhang L. 2004. Hydrological responses to conservation practices in a catchment of the Loess Plateau, China. *Hydrological Processes*, **18**: 1885–1898.
- Leh MDK, Matlock MD, Cummings EC, et al. 2013. Quantifying and mapping multiple ecosystem services change in West Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, **165**: 6–18.
- Martinez ML, Perez-Maqueo O, Vazquez G, et al. 2009. Effects of land use change on biodiversity and ecosystem services in tropical montane cloud forests of Mexico. *Forest Ecology and Management*, **258**: 1856–1863.
- McCarthy JJ. 2001. *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability: Contribution of Working Group II to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- McFarlane D, Stone R, Martens S, et al. 2012. Climate change impacts on water yields and demands in south-western Australia. *Journal of Hydrology*, **475**: 488–498.
- R Development Core Team, R.D.C. 2016. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: the R Foundation for Statistical Computing.
- Schenk HJ, Jackson RB. 2002. Rooting depths, lateral root spreads and below-ground/above-ground allometries of plants in water-limited ecosystems. *Journal of Ecology*, **90**: 480–494.
- Sharp R, Tallis HT, Ricketts T, et al. 2016. *InVEST + VER-SION+ User's Guide*. Stanford: The Natural Capital Project Press.
- Su CH, Fu BJ. 2013. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. *Global and Planetary Change*, **101**: 119–128.
- Tan K, Piao SL, Peng CH, et al. 2007. Satellite-based estima-

- tion of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999. *Forest Ecology and Management* , **240**: 114–121.
- Tang C , Crosby BT , Wheaton JM , *et al.* 2012. Assessing streamflow sensitivity to temperature increases in the Salmon River Basin , Idaho. *Global and Planetary Change* , **88–89**: 32–44.
- Xu XL , Liu W , Scanlon BR , *et al.* 2013. Local and global factors controlling water-energy balances within the Budyko framework. *Geophysical Research Letters* , **40**: 6123–6129.
- Yin Y , Wu S , Zheng D , *et al.* 2008. Radiation calibration of FAO56 Penman-Monteith model to estimate reference crop evapotranspiration in China. *Agricultural Water Management* , **95**: 77–84.
- Zhang L , Dawes WR , Walker GR. 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research* , **37**: 701–708.
-
- 作者简介 吴 健 ,男 ,1993 年生 ,硕士研究生 ,研究方向为生态系统生态学。E-mail: wujian115@mails.ucas.ac.cn
- 责任编辑 张 敏
-