

DOI: 10.5846/stxb201806211366

崔景轩, 李秀芬, 郑海峰, 付尧, 张斯屿. 典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征研究. 生态学报, 2019, 39(9): - .

Cui J X, Li X F, Zheng H F, Fu Y, Zhang S Y. Spatial analysis of water conservation function in northeast China under different climatic conditions. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(9): - .

典型气候条件下东北地区生态系统水源涵养功能特征研究

崔景轩^{1,2}, 李秀芬¹, 郑海峰^{2,3,*}, 付尧^{2,3}, 张斯屿^{2,3}

1 沈阳农业大学, 沈阳 110866

2 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130102

3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 东北地区是我国重要的生态功能区, 其包含的典型生态系统具有独特的水源涵养功能, 在防洪减灾, 保障生态安全 and 人居安全中发挥着关键作用。以往有关水源涵养功能的研究主要是依托不同水文模型方法, 从单一年份或多个年份的角度进行研究, 较少考虑不同气候条件下水源涵养功能的时空分异特征。采用标准化降水蒸散发指数 (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI) 划分研究区的典型气候年份 (干旱、正常和湿润); 基于水量平衡法, 结合 SCS-CN 模型以及 Penman-Monteith 方程对东北地区典型气候条件下生长季内的水源涵养功能进行研究。结果表明: (1) 研究区水源涵养功能在不同气候条件下差异明显, 三个典型气候年份生长季内的水源涵养总量分别为: 干旱年 (SPEI = -1.26) 为 2214.64 亿 m^3 、正常年 (SPEI = -0.22) 为 3231.49 亿 m^3 和湿润年 (SPEI = 1.05) 为 3969.33 亿 m^3 。(2) 水源涵养功能空间变异突出, 但在三种典型气候条件下呈现出一致变化, 均表现为长白山地区水源涵养量 (单位: mm) 最大, 大小兴安岭地区次之, 水源涵养量最低的地方主要出现在呼伦贝尔以西的草原地区, 在东北平原的部分地区也有低值的出现, 如白城、通辽、鸡西等地区, 水源涵养量较一般的地方出现在东北平原大部分以农田为主的地区。(3) 水源涵养功能除受气候因素的影响外, 还取决于土地利用类型的变化, 对于整个东北地区来讲, 水源涵养总量 (单位: m^3) 表现为林地 > 农田 > 草地 > 湿地, 单位面积水源涵养量 (单位: mm) 在干旱年和正常年表现为林地 > 农田 > 湿地 > 草地, 在湿润年份表现为林地 > 湿地 > 农田 > 草地。研究结果揭示了东北地区三种典型气候条件下重要生态系统的水源涵养功能大小、空间分布特征及其主要驱动因素, 可为区域生态空间规划和生态系统管理提供科学指导。

关键词: 水源涵养; 标准化降水蒸散发指数; 东北地区; SCS 模型

Spatial analysis of water conservation function in northeast China under different climatic conditions

CUI Jingxuan^{1,2}, LI Xiufen¹, ZHENG Haifeng^{2,3,*}, FU Yao^{2,3}, ZHANG Siyu^{2,3}

1 Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China

2 Northeast Institute of Geography and Agro ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Northeast China is one of the important ecological functional areas in China. There are several types of ecosystems in the region and each has its unique water conservation function. Ecosystems are known to play a significant role in flood control and disaster reduction, as well as provide ecological and human settlement security. Previous studies on water conservation function have depended mainly on different hydrological models with varying temporal scales; however, few

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0500300); 国家自然科学基金面上项目 (41771206); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA19040500)

收稿日期: 2018-06-21; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhenghaifeng@iga.ac.cn

studies have investigated the spatial distribution of water conservation function under different climatic conditions. In the present study, a standardized precipitation evaporation index (SPEI) was used to select the typical climate years (dry, normal, and wet) for the study area. The water conservation function under different climatic conditions was analyzed based on the water balance method, the SCS-CN model, and the Penman-Monteith equation. The results indicated that the total amount of water conservation in the growing seasons varied significantly under different climatic conditions in northeast China. They were 221.464, 323.149, and 396.933 billion m^3 in the dry (SPEI = -1.26), normal (SPEI = -0.22), and wet year (SPEI = 1.05), respectively. The Changbai mountain area had the highest water conservation function, followed by the Daxing'an and Xiaoxing'an Mountain areas. The lowest water conservation quantity was distributed mainly in the pasture area in the west of Hulunbuir. Some areas of the Northeast Plain also had low water conservation such as Baicheng, Tongliao, and Jixi. Moreover, the areas of farmland plain, located in the middle, south, and east of northeast China such as most areas of Songnen, Liaohe, and Sanjiang plains had moderate water conservation function. Both climatic conditions and land-use types affected the extent of water conservation. The total amount of water conservation followed the order of forest > cropland > grassland > wetland. In dry and normal years, land use dramatically affected the average water conservation capacity per area in the order of forest > cropland > wetland > grassland. In contrast, the order of the value for wet years is forest > wetland > farmland > grassland. These results reveal the quantity, spatial distribution, and main driving factors for water conservation in important ecosystems under three typical climates in the northeast of China. This provides scientific guidance for regional ecological space planning and ecosystem management.

Key Words: water conservation; SPEI; Northeast China; SCS-CN model

生态系统向人类提供了生存所必须的环境和产品,发挥着极其重要的生态服务功能^[1]。然而,自工业革命以来,在气候变化和人类活动的双重影响下,生态系统遭到了严重的破坏^[2],导致了大部分地区生态系统的服务功能明显下降,造成了一系列的严重后果^[3]。例如在 1998 年,长江和松花江等流域发生了重大的洪水灾害,造成了巨大的经济损失,对流域沿线居民的生存与发展造成了严重威胁^[4]。为了缓解类似的自然灾害,国家先后采取了多项生态保护与恢复工程来提高生态系统的涵养水源能力,比如天然林保护工程、退耕还林还草工程等^[5],以期有效地维护重点地区的生态系统服务功能^[6]。

水源涵养功能作为陆地生态系统的重要功能,受到气候变化、土壤理化性质、植被覆盖类型、地形地貌特征等诸多因素的影响,而且在空间上存在很大变异性,因此,如何准确地评价水源涵养功能一直是水文学及生态研究的热点和难点^[7]。随着对水源涵养功能理解的不断加深,从早期生态系统调节径流到后来降水拦蓄、水质净化、土壤蓄水量的研究,人们越发理解了生态系统水源涵养功能的重要性^[8]。国内外学者对水源涵养功能进行了广泛地研究,国外学者侧重于对产水量以及产沙量进行研究,并且多采用模型的方法,如 SWAT 模型^[9]以及 InVEST 模型^[10]等;国内学者的相关研究集中于采用多种计算方法模拟某地区的水源涵养量,如模型法和水量平衡法等^[11],进而研究其时空变化。综合以上研究发现,水量平衡法是研究水源涵养机理的基础,操作简单,能够较为准确的计算水源涵养量,是目前使用最为广泛的方法^[12-15]。然而,目前对于水源涵养功能的研究多集中于对研究区多年平均或某一年水源涵养特征的分析,缺少不同气候条件影响下水源涵养能力差异的研究。

东北地区处于欧亚大陆东岸,生态系统类型多样,是典型的气候敏感区和脆弱区,也是退耕还林还草工程实施效果较为显著的地区。由于受到气候和地理位置的影响,东北地区的生态系统特征在时间和空间上差异显著,研究典型气候条件下该区水源涵养功能特征显得尤为迫切。本文选用 SPEI 指数分析近几十年来东北地区气候特征,按固有的分类标准划分出干旱,正常以及湿润 3 个典型年份;以水量平衡法为基础,结合 Penman-Monteith 公式和 SCS-CN 模型,修订相关参数,进而模拟典型气候条件下东北地区生长季内生态系统水源涵养功能,以期客观地认识不同生态系统的水源涵养功能空间分布特征,为东北地区水资源的合理配置、

空间防洪减灾规划和生态系统管理提供科学依据。

1 数据来源

本文所用的干旱指数 SPEI 数据来自于美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)^[16],下载数据时间为 1980—2016 年,分辨率为 0.5°,尺度为 12 个月,存储为 NC 格式文件。气象数据来源于中国气象数据共享中心的中国地面气候资料日值数据集(V3.0),提取出东北地区及其周边共 124 个站点 2001 年,2010 年及 2013 年 4 月到 9 月的逐日气象资料,包括降水,温度,日照时数,相对湿度和风速,该气象数据经中国气象局严格质量监控,数据精度和实有率达到 99% 以上。土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心,选用 2000 年和 2010 年两期 1:100 万土地利用分类图,土地利用类型包括农田、林地、草地、水域、城镇工矿用地和未利用地 6 个一级类型以及 25 个二级类型。DEM 数据分辨率为 90 m,来源于美国奋进号航天飞机的雷达地形测绘 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数据,由中国科学院资源环境科学数据中心下载。土壤数据来自寒区旱区科学数据中心基于世界土壤数据库(Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD)的中国土壤数据集(V1.1),中国境内数据源为第二次全国土地调查南京土壤所提供的 1:100 万土壤数据,采用 FAO-90 土壤分类系统。详细数据信息见表 1。

表 1 主要数据来源
Table 1 The main data sources

数据类型 Data type	数据描述 Data description	数据源 Data source
土地利用分类数据 Land use classification data	中国 1:100 万土地利用现状遥感监测数据,本研究选用 2000 年和 2010 年共两期	中国科学院资源环境科学数据中心
数字高程模型数据 Digital Elevation Model data	DEM 数据分辨率为 90 m	中国科学院资源环境科学数据中心
土壤数据 Soil data	数据来源于联合国粮农组织(FAO)和维也纳国际应用系统研究所构建的世界土壤数据库(HWSD)	寒区旱区科学数据中心
气象数据 Meteorological data	选取东北地区及其周边共 124 个气象站 2001 年,2010 年和 2013 年 4 月到 9 月逐日气象资料	中国气象数据共享网
干旱数据 The drought data	1980—2016 年 12 个月尺度下的 SPEI 指数	美国国家大气研究中心

2 研究方法

2.1 SPEI 指数处理

标准化降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),是当前能够较好反映干旱评价的指数之一,它既反映了温度和降水对干旱的影响,同时又考虑了时间尺度的累计效应。近 50 年东北地区年平均气温上升 1.5 ℃,年降水量和生长季降水量均呈减少趋势,促使了东北地区干旱的频繁发生,尤其是 21 世纪以来的十几年里,这种气候变化尤为明显^[17]。有许多研究表明,SPEI 指数可以有效定量东北地区的干旱特征^[18-21]。本文利用 12 个月尺度下的 1980—2016 年的 SPEI 指数数据分析气候年际变化。按 Yu 等^[18]提出的干旱等级划分标准,将东北地区干旱等级分为重度干旱、中度干旱、轻度干旱、正常、轻度湿润、中度湿润和重度湿润七个等级(表 2)。

表 2 按 SPEI 划分的干旱/湿润标准
Table 2 Categorization of dryness/wetness grade by the SPEI

SPEI 值 Value of SPEI	≤ -2	-1.99—-1.5	-1.49—-1.0	-1.0—1.0	1.0—1.49	1.5—1.99	≥ 2.0
干旱等级 Dry grade	重度干旱	中度干旱	轻度干旱	正常	轻度湿润	中度湿润	重度湿润

SPEI: 标准化降水蒸散发指数, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

2.2 降雨量和蒸散量计算

图 1 为研究区气象站点分布图。本研究采用基于局部薄盘样条理论的 ANUSPLIN 插值方法^[22]对东北地

区及其周边共 124 个站点日降雨量和日蒸散量进行空间插值,该方法专用于气象要素空间插值,是目前较好的一种曲面插值方法^[23]。蒸散计算使用的是 FAO-56 分册推荐的 Penman-Monteith 方程^[24],公式中涉及的大气物理参数(R_n 、 G 、 T 、 U_2 、 e_s 、 e_a 、 Δ 、 γ)均可以通过站点逐日气象资料计算得出(包括风速、湿度、温度以及日照时数),进而计算出逐日逐站的蒸散量,表达式如下:

$$ET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, ET 为可能蒸散量(mm/d); R_n 为地表净辐射($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T 为日平均气温($^{\circ}\text{C}$); U_2 为 2 m 高处风速(m/s); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa); Δ 为饱和水气压曲线斜率($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$)。

2.3 基于 SCS 模型模拟地表径流量

本研究采用 SCS 模型模拟东北地区地表径流,该模型是美国农业部水土保持局(现更名为自然资源保护局)20 世纪 50 年代研发的水文模型,结构简单,所需参数少,并可应用于无资料地区等特点,已被广泛用来模拟径流量^[25-26]。

2.3.1 SCS 模型原理

SCS 模型基于水量平衡方程以及 Mockus 等人建立的降雨径流关系式^[27]:

$$P = Ia + F + Q \quad (2)$$

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P - Ia} \quad P \geq Ia \quad (3)$$

式中, P 为总降雨量(mm); Q 为地表径流量(mm); F 为地表径流产生后的后损,即实际累计下渗量(mm); Ia 为地表径流产生前降雨量的初损(mm); S 为土壤当时最大持水量,是后损的上限(mm)。

根据式(2)、(3)可推导 Q 的计算公式,如式(4):

$$Q = \frac{(P - Ia)^2}{P - Ia + S} \quad P \geq Ia \text{ 否则 } Q = 0 \quad (4)$$

降雨的初损量 Ia 包括地面坑洼、截留、下渗初损量等。模型设计者将 Ia 和 S 的关系做如下假设:

$$Ia = \lambda S \quad (5)$$

式中, λ 为初损率,随不同地区的自然地理情况和水文条件的差异而变化,取值范围为 0.1—0.3,为方便计算,对该参数的选取常选取为 0.2^[28]。

S 值随空间变化很大,通常由 CN 计算得出,计算方法如式(6):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

式中, CN 为径流曲线值,是反映土地利用类型、土壤类型、坡度及前期土壤含水量的一个综合指标。土地利用数据集涵盖了农田、林地、草地、水体、建设用地和未利用地 6 个一级类型以及 25 个二级类型,整理其中的林地,农田,草地以及水体 4 类进行分析,结合美国国家工程手册第四章中的 CN 值查算表^[29]及相关文献查取 CN 值^[30];土壤水文分组反映水分入渗速度的快慢,按照模型标准将土壤划分为 A、B、C、D 共 4 类;前期土壤水分(AMC)依径流产生之前 5 天的降雨总量分为 3 级,AMC I (干旱),AMC II (一般),AMC III (湿润),东北地区为季风性气候,降水多集中在雨季,为便于计算本文选取一般条件模拟研究区径流量,最终 CN 值见表 3。

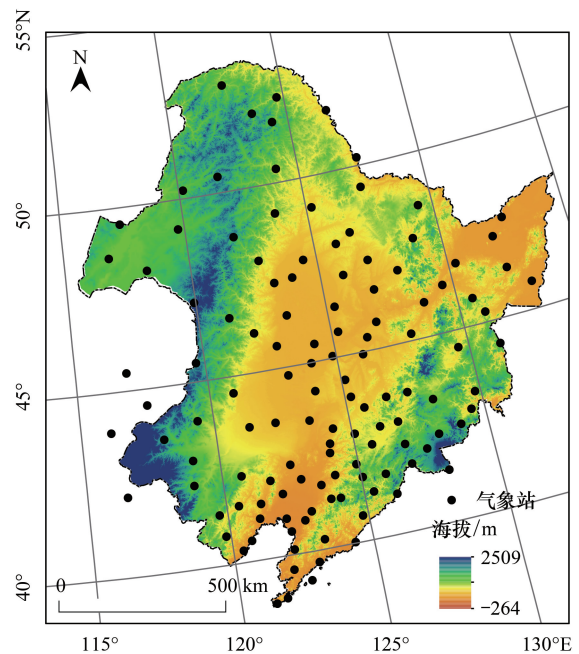


图1 东北地区气象站点

Fig.1 Meteorological stations in northeast China

表 3 不同土地利用类型的 CN 值
Table 3 CN values of different land use types

土地利用类型 Land-use type	不同土壤水分分组的 CN 值 CN numbers of different hydrologic soil groups			
	A	B	C	D
水田 Paddy field	98	98	98	98
旱地 Dry land	67	78	85	89
有林地 Forest land	36	60	73	79
灌木林 Shrub wood	35	56	70	77
稀疏林地 Sparse wood	45	66	77	83
茂盛草地 Lush grass	49	69	79	84
稀疏草地 Sparse grass	68	79	86	89
水体 Water body	98	98	98	98
沼泽地 Marshland	32	58	72	79

CN: 径流曲线值, curve numbers

2.3.2 CN 值坡度修正

坡度对径流有很大的影响,传统模型假设在一般条件下坡度为 5%,Williams 等^[31-32]提出了对一般条件下 CN 值的订正公式:

$$CN_{\alpha} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2)(1 - 2e^{-13.86\alpha}) + CN_2 \quad (7)$$

式中, CN_{α} 为坡度修正后的 CN_2 , CN_2 和 CN_3 分别表示 AMC II 和 AMC III 条件下的 CN 值, α 表示坡度(%)。

2.4 水源涵养量模拟

本研究基于水量平衡方程(The Water Balance Equation)在日尺度上模拟了水源涵养量,水量平衡法将生态系统视为一个“黑箱”,忽略中间过程,把大气降水视为水量的输入,蒸散量及径流量视为水量的输出,根据水量平衡原理,水量的输入和输出之差即水源涵养量^[12]。

$$WR = P - ET - Ra \quad (8)$$

式中,各因子均为日尺度下模拟值, WR 为水源涵养量(mm); P 为降雨量(mm); Ra 为地表径流量(mm); ET 为蒸散量(mm),随后通过 ArcGIS 的栅格计算器叠加出整个生长季(4—9 月共 183 天)的水源涵养量。

3 结果分析

3.1 东北地区典型气候选择及其特征分析

1980 年到 2016 年东北地区 12 个月尺度下的年平均 SPEI 指数变化如图 2 所示,从图中可以看出,东北地区气候呈现出干湿波动变化,大多数年份的年平均 SPEI 指数在-0.5 到 0.5 之间浮动变化,部分地区出现干旱和湿润交替。1980—1999 年,干旱发生较少,气候偏湿润;而在 2000 年以后干旱频繁发生,干湿交替更加明显。结合图 2 与图 3 可知,东北地区在 2000—2002 年及 2007—2008 年的干旱较为严重,平均 SPEI 值在-1 左右,其中又以 2001 年最为严重,年平均 SPEI 指数达到-1.26。2001 年干旱面积约占总面积的 79.72%,其中轻度干旱和中度干旱面积占总面积的 37.04%和 39.95%,重旱占总面积的 2.73%。2013 年东北地区降水丰富,气候极其湿润,年平均 SPEI 指数 1.05,干旱发生较少,湿润面积占总面积的 59.21%,其中重度湿润和中度湿润分别占总面积的 0.57%和 11.12%。2000 年以后东北地区气候变化频繁,为了方便与干旱和湿润年份对比分析,选取该时段正常面积最大的 2010 年作为正常年份的代表,SPEI 指数为-0.22。

图 4 为 2001 年、2010 年以及 2013 年干旱空间分布图。2001 年干旱的发生以中度干旱和轻度干旱为主,重度干旱发生在黑龙江西南部及吉林西北部地区;2010 年大部分地区都为正常情况,在研究区西北部的部分地区出现了局部的干旱;2013 年以轻度湿润为主,主要包括辽宁大部地区、吉林的临江东岗一带沿西北至黑龙江的漠河地区以及与辽宁西北部接壤的内蒙古地区,其余地区多为正常情况,无干旱发生。

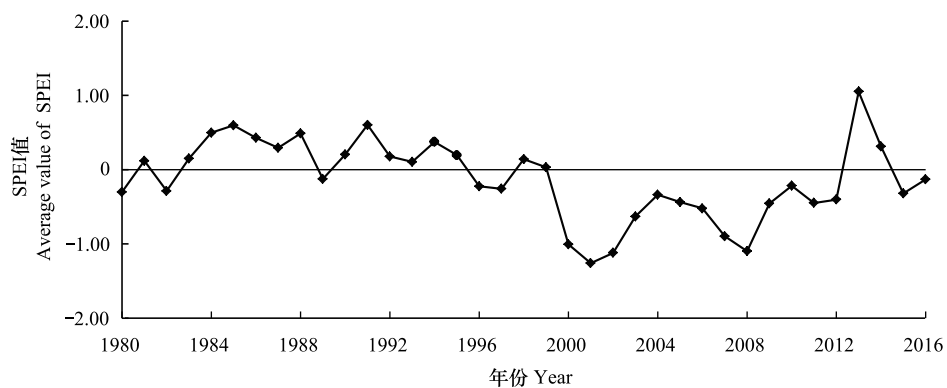


图2 1980—2016年东北地区年平均SPEI

Fig.2 Annual average SPEI in northeast China from 1980 to 2016

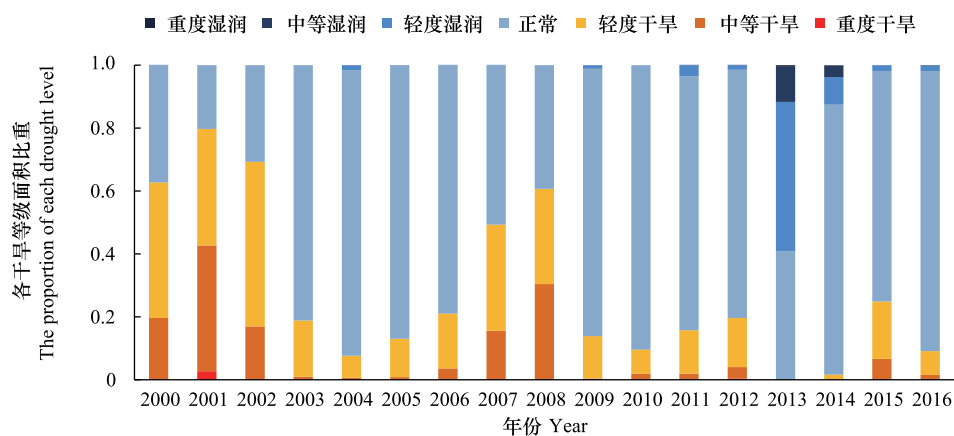


图3 2000—2016年各干旱等级面积比重

Fig.3 The proportion of each drought grade area from 2000 to 2016

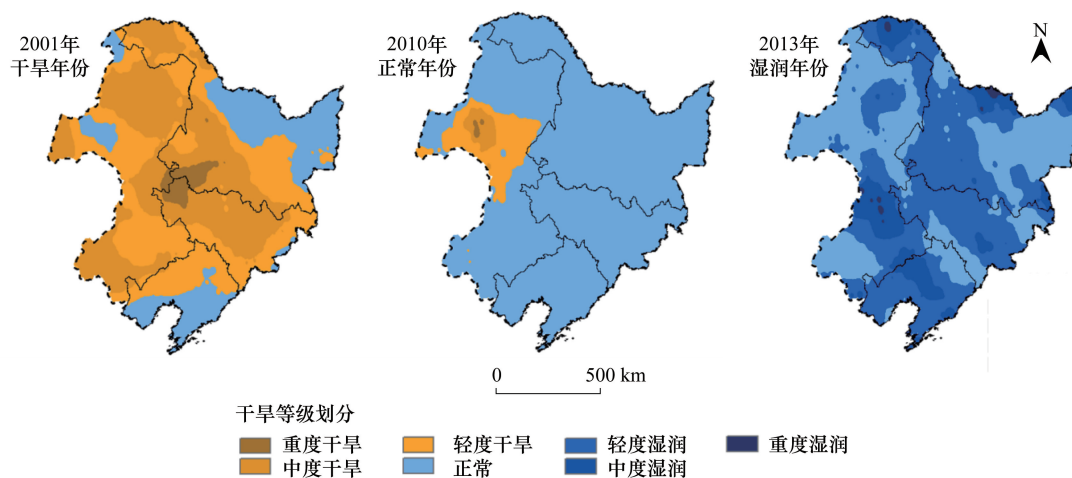


图4 2001年、2010年和2013年干旱分布特征

Fig.4 The spatial distribution of drought in 2001, 2010 and 2013

3.2 典型气候条件下东北地区的降雨、蒸散和径流分布

3.2.1 降雨特征

图 5 为东北地区三个典型年份生长季内的降雨分布,降雨高值区均出现在长白山地区,低值区均出现在研究区西部呼伦贝尔草原地区以及中部到西南部的平原地区,生长季内平均降雨量分别为干旱年 342.61 mm,正常年 464.58 mm 和湿润年 548.57 mm。2001 年为代表性干旱年份,生长季内大部分地区降雨量不足 400 mm,以研究区中西部地区为低值中心,呼伦贝尔草原地区降雨量不足 200 mm,向东以环形扩散增加。在研究区的北部地区、东南部的长白山地区以及三江平原地区的东北部出现了 400 mm 以上的降雨并且向外扩散减小。2010 为正常年份,在生长季内的降雨呈现东高西低,南高北低的趋势。降水低值中心出现在研究区的西部地区,降雨不足 200 mm。内蒙古东部地区,吉林西部以及黑龙江大部分地区的降雨量在 300—450 mm。降雨高值中心在长白山地区,降雨量达 600—800 mm,部分地区超过 850 mm。在 2013 年湿润年份,全地区生长季内降雨充足,仅少数地区降雨量低于 400 mm,出现在呼伦贝尔草原的西部地区以及研究区西南部的草原和平原地区,降雨高值区在东北北部地区、长白山地区以及三江平原东北部地区,降雨量达 600—800 mm,部分地区可达 850 mm 以上,大部分地区降雨量在 400—600 mm 之间,分布在研究区的北部,中部和东部。

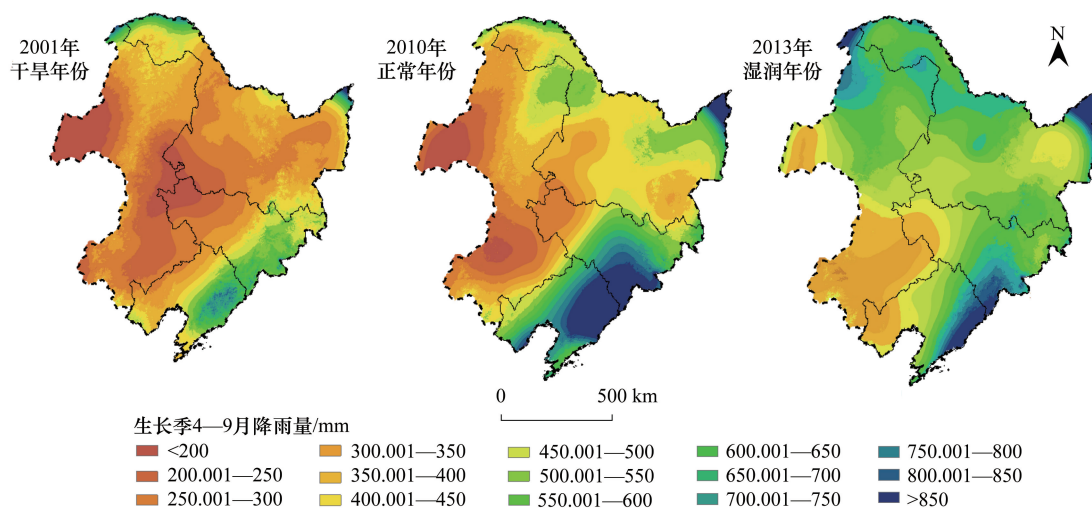


图 5 干旱、正常和湿润年份降雨量分布

Fig.5 The spatial distribution of rainfall in dry, normal and wet years

3.2.2 蒸散特征

由图 6 可知,在 3 个年份生长季 4—9 月内,蒸散存在着南高北低的分布特征,较低的蒸散均出现在研究区北部漠河一带,蒸散量在 300 mm 以下。呼伦贝尔草原地区、三江平原地区以及研究区中部到西南部的松嫩平原和辽河平原地区为东北地区的 3 个高蒸散区,生长季内气温较高,蒸发较大,植物生长又产生较大蒸腾。海拔较高的林区,如长白山一带,生长季内蒸散量也很高,并且年际变化较为稳定,在 400—600 mm 左右。

3.2.3 径流特征

图 7 为生长季径流量分布图,东北地区在 3 个典型气候年份下生长季内平均径流量分别为干旱年 30.28 mm,正常年 56.16 mm,湿润年 64.80 mm。本研究模拟的径流量为地表径流,所以在林地上基本无径流产出。在东北平原上存在较大面积的水田及湿地,易产生地表径流,如三江平原的北部,辽河平原的中部及松嫩平原的大部地区。在东北地区的西部草地与农田相间分布,呼伦贝尔草原地区又多湿地和草地分布,土壤蓄水能

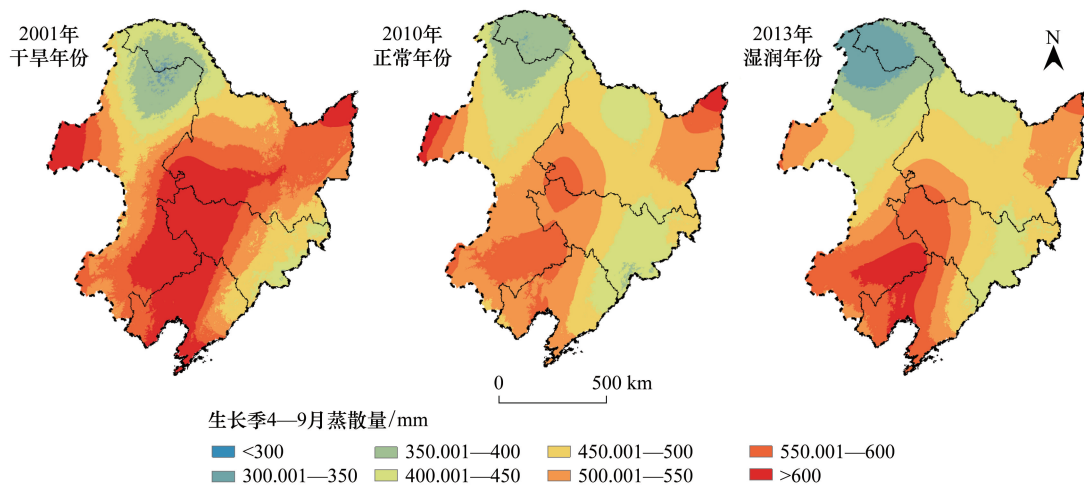


图6 干旱、正常和湿润年份蒸散量分布

Fig.6 The spatial distribution of evapotranspiration in dry, normal and wet years

力较弱,同样容易产生地表径流。

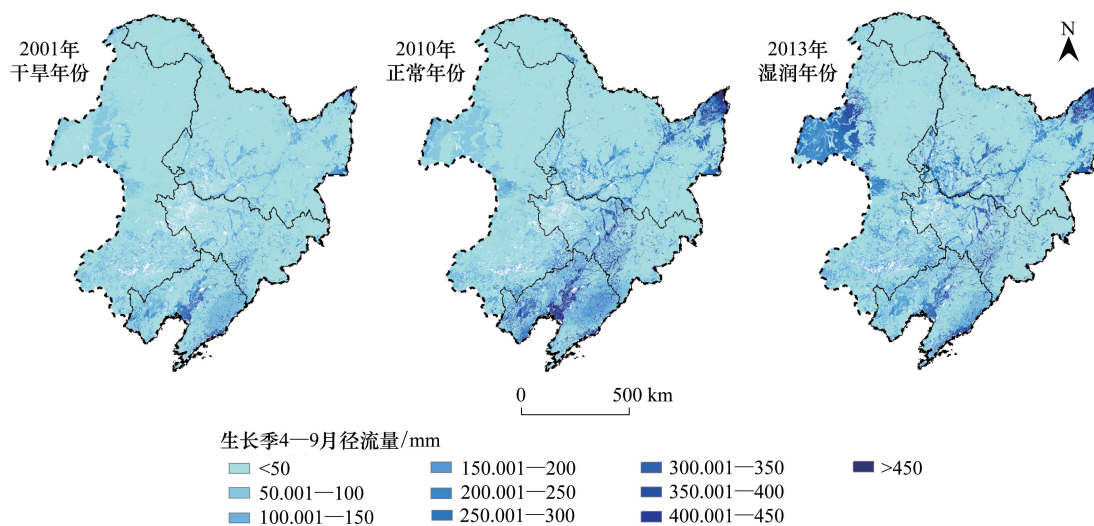


图7 干旱、正常和湿润年份径流量分布

Fig.7 The spatial distribution of runoff in dry, normal and wet years

3.3 典型气候条件下东北地区生态系统的水源涵养功能特征

3种典型气候条件下东北地区水源涵养总量差距很大,水源涵养总量分别为干旱年份 2178.19 亿 m^3 , 正常年份 3231.49 亿 m^3 以及湿润年份 3969.33 亿 m^3 。如图8所示,水源涵养量(mm)的空间分布存在一致性,3个年份存在共同的水源涵养低值区与高值区,低值区位于呼伦贝尔以西的草原以及松嫩平原、三江平原和辽河平原的部分地区,如白城、通辽、鸡西等,这些地区蒸散量较大,土地利用类型以草地、水田和水体为主,以呼伦贝尔草原为代表,生长季内水源涵养量不足 100 mm。水源涵养量一般的地方同样集中在东北三大平原地区,这些地区旱地面积很大,同时也存在许多沼泽湿地,降雨量处于平均水平,水源涵养量较高。水源涵养量的高值区出现在长白山地区,这一地区的降水丰富,土地覆盖多为林地和沼泽湿地,水源涵养量最大,在干旱年份仍可达 400 mm 以上。水源涵养量次高值出现大小兴安岭一带,该区土地利用类型同样以林地为主,由于降雨不及长白山地区丰富,水源涵养量稍低。

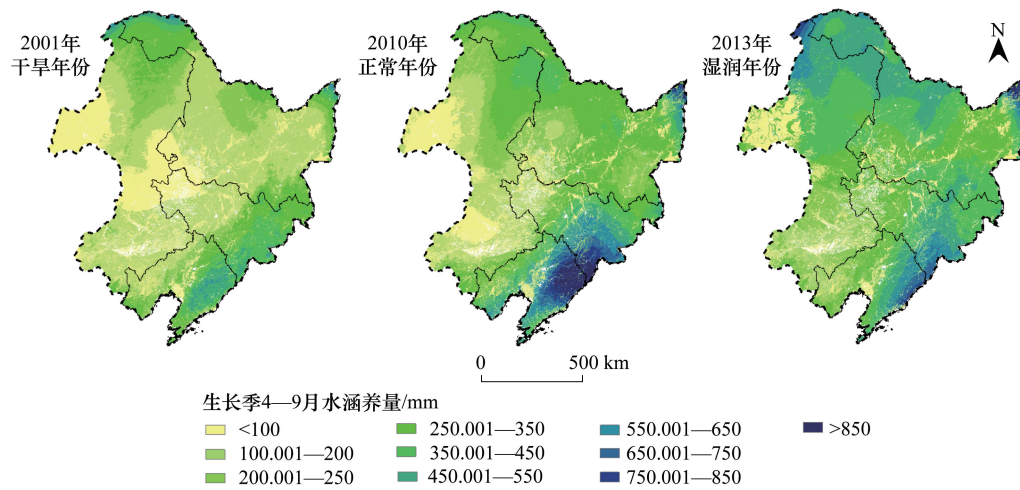


图 8 干旱、正常和湿润年份水源涵养量分布

Fig.8 The spatial distribution of water conservation in drought, normal and wet year

3.4 水源涵养驱动因素分析

生态系统的水源涵养功能受地理与气候的影响呈现出较强的空间差异性。本文在 GIS 中基于栅格数据对水源涵养量与其驱动因素做了相关性分析(表 4)。结果表明,水源涵养量主要受降雨影响,在干旱、正常和湿润年份均呈现出显著的正相关($R=0.863, P=0.000; R=0.828, P=0.000; R=0.728, P=0.000$)。蒸散量和径流量与水源涵养量之间相关性较弱,但仍呈现出显著的负相关,其中蒸散的相关性稍强(干旱年 $R=-0.485, P=0.000$;正常年 $R=-0.327, P=0.000$;湿润年 $R=-0.567, P=0.000$)。

表 4 典型气候条件下水源涵养量与其相关因子的相关性

Table 4 Pearson correlation between water conservation and related factors under typical climate conditions

结果 Result	降水 Precipitation			蒸散 Evapotranspiration			径流 Runoff		
	2001	2010	2013	2001	2010	2013	2001	2010	2013
相关性 Person	0.863 **	0.828 **	0.728 **	-0.485 **	-0.327 **	-0.567 **	-0.276 **	-0.146 **	-0.544 **
显著性 Significance	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

3 个年份生长季内平均降雨量、平均蒸散量、平均径流量以及平均水源涵养量情况如图 9 所示。干旱年生长季内平均水源涵养量 186.87 mm, 占生长季内平均降雨量的 57.56%; 正常年份生长季内平均水源涵养量 277.65 mm, 占生长季平均降雨量的 49%; 湿润年份生长季内平均水源涵养量 340.88 mm, 占生长季平均降雨量的 62.14%。图 10 表示 3 个典型年份下不同土地利用类型的平均水源涵养能力, 从图中可以看出, 不同土地利用类型的平均水源涵养能力存在差异, 平均水源涵养量在干旱和正常年份表现为林地>农田>湿地>草地, 而在湿润年份表现为林地>湿地>农田>草地。

从表 5 可以看出, 3 个年份的水源涵养总量在各生态系统下分布规律相同, 均呈现为: 林地>农田>草地>湿地的分布形式。森林是东北地区水源涵养主体, 林地水源涵养总量在干旱年为 1291.44 亿 m^3 , 正常年份可

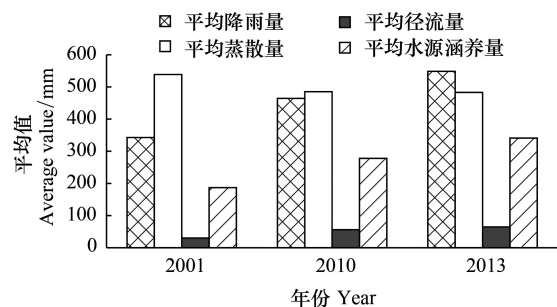


图 9 典型气候条件下东北地区平均降雨量、平均蒸散量、平均径流量以及平均水源涵养量

Fig.9 The average rainfall, evapotranspiration, runoff and water conservation in northeast China in drought, normal and wet year

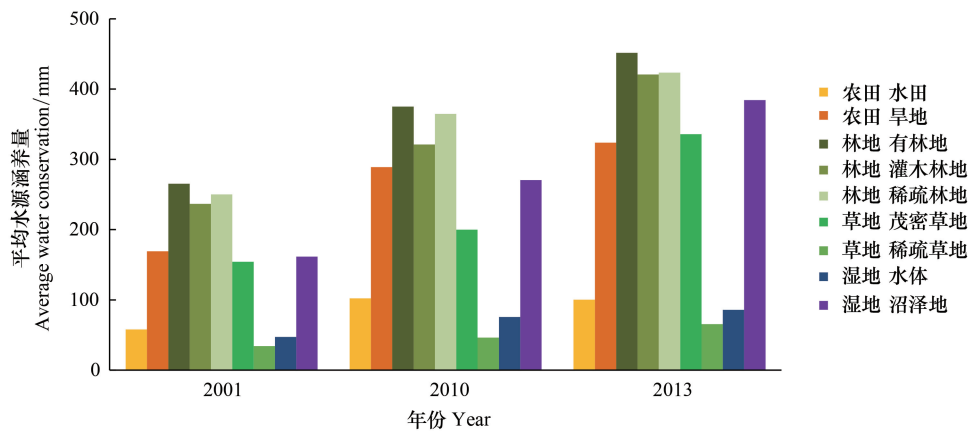


图 10 典型气候条件下东北地区各生态系统平均水源涵养量

Fig.10 The average water conservation of various ecosystems in northeast China in drought, normal and wet year

达 1821.99 亿 m^3 ,湿润年份可达 2201.73 亿 m^3 ;林地中以有林地为主体,结合图 10,有林地的平均水源涵养量 (mm)最大,灌木林地和稀疏林地相比于有林地,土壤蓄水能力较弱,平均水源涵养量不及有林地。水源涵养总量次高的生态系统类型为农田,2001 年农田水源涵养总量 564.76 亿 m^3 ,其中旱地占 95.46%,约为 539.14 亿 m^3 ;2010 年农田水源涵养总量 966.45 亿 m^3 ,旱地占 95.01%,约 918.23 亿 m^3 ;2013 年湿润年农田水源涵养总量 1076.1 亿 m^3 ,其中旱地占 95.60%,为 1028.77 亿 m^3 。东北地区的草地面积是湿地面积的 3 倍,从图 10 的平均水源涵养量上看,湿地的平均水源涵养量整体强于草地,但受所占面积的影响,湿地的水源涵养总量不及草地。3 个年份中草地的水源涵养总量分别为 241.14 亿 m^3 、312.76 亿 m^3 以及 512.38 亿 m^3 ;湿地的水源涵养总量分别为 80.84 亿 m^3 、130.30 亿 m^3 以及 179.11 亿 m^3 。

表 5 干旱、正常和湿润年份下不同土地利用类型水源涵养总量

Table 5 The total amount of water conservation under different land use types in drought, normal and wet years

土地利用类型 Land-use type		水源涵养总量 Total water conservation/亿 m^3		
		2001	2010	2013
农田 Cultivated land	水田 Paddy field	25.63	48.22	47.34
	旱地 Dry land	539.14	918.23	1028.77
林地 Forest	有林地 Forest land	1072.72	1507.11	1814.57
	灌木林 Shrub wood	105.27	144.53	189.36
	稀疏林地 Sparse wood	113.44	170.35	197.80
草地 Grassland	茂盛草地 Lush grass	205.37	264.41	444.00
	稀疏草地 Sparse grass	35.77	48.35	68.38
湿地 Wetland	水体 Water body	13.19	20.82	23.63
	沼泽地 Marshland	67.64	109.48	155.48

4 讨论

(1)本研究主要从气候条件和生态系统类型两个方面对水源涵养功能进行了分析,不同气候条件下东北地区干湿变化较大,降雨、蒸散和径流作为水源涵养功能的主要驱动因子,在不同水热年份下变化明显,水源涵养功能的差异与气候差异直接相关^[15]。径流量的变化主要受降雨量和下垫面的影响,林地上土壤结构较好,水分会更好的入渗,地表径流较低^[12],而水体和水田作为水分传输的载体,河道两侧的河床土壤粒径较大,对水分的截留作用较弱^[33],产生的地表径流较大。在不同气候条件下,蒸散受降水、温度、风速和辐射等指标的影响,在数值上变化同样很大,但空间分布大致稳定,均呈现出南高北低的形式。降水和蒸散均对水源

涵养量有极为显著的相关性,其中又以降水的相关性最为明显,因此降水是不同气候条件下水源涵养功能存在差异的主要气候因素。对于降水来说,在正常年份下,研究区降水的分布与张杰^[34]和刘正佳^[35]的结果整体相近,即东北地区降水高值区在长白山地区,低值区在研究区的西部地区。与正常年份相比,干旱年份内整个研究区的降水量均出现不同幅度的减小,降水高值区向东南方向收缩,降水低值区向东部扩张。在湿润年份,趋势恰好相反,全区域降水量较大,降水低值区向西部收缩,高值区扩张到研究区的北部和东南部地区。水源涵养量的空间分布上,其低值区和高值区分布变化与降雨量高值和低值区的变化十分吻合。

(2)国家实施退耕还林、还草等生态工程已经取得了重大的生态效益,与此同时,导致生态系统服务功能发生了改变,因此水源涵养功能不仅受气候变化的影响,还受下垫面因素的影响,植被覆盖越好,水源涵养功能越强^[36]。水源涵养功能较差的地区为呼伦贝尔以西的草原地区以及东北三大平原的局部地区,其中呼伦贝尔以西的草原地区降水稀少,蒸散量大,植被以稀疏草地为主,降水截留能力弱;该地区东部值开始变大,恰好是草地茂盛、旱地面积较大的地区。在三大平原中水源涵养量低值均出现在下垫面为水体和水田的地区,该区蒸发和地表径流很强,截留降水的能力同样很弱。对于长白山和大小兴安岭地区来说,生态系统多样,植被覆盖丰富,改变了土壤的性质,导致土壤下渗和持水能力很强^[37],基本无地表径流的产生,虽然茂密的植被会产生较强的蒸散,但同时该地区也存在着丰富的降水,此消彼长之下该区水源涵养量依然很大。龚诗涵等^[14]对中国的主要生态系统的水源涵养功能进行了分析,研究结果中有关东北地区水源涵养功能的描述和本文基本相同,即长白山地区的水源涵养功能最强,其次为大小兴安岭地区,且结论中的数量级一致,但在他们的研究中并未涉及到农田的水源涵养状况。东北三大平原上存在着大面积的农田和湿地,在沼泽湿地的附近一般都有农田分布,此时从单元水源涵养量上看,在相同地理和气候条件下,沼泽湿地上的径流量小,旱地的径流量高,这就导致单元上沼泽湿地的水源涵养量要高于旱地。本研究进而对东北地区各个生态系统内的平均水源涵养量进行了统计,结果反映的是整个研究区中各个生态系统水源涵养量的平均状态,发现在干旱和正常年份时,研究区下农田生态系统的平均水源涵养量要稍高于湿地生态系统,这是由于东北地区农田空间分布较广,水源涵养量变化很大,进而影响了平均值。在湿润年份时,整个研究区降水丰富,空间差异并不突出,此时得到的结果更好的反映出了农田和湿地的水源涵养能力,结果为湿地生态系统强于农田生态系统是可以理解的。

(3)在水源涵养量模拟的实际应用中,常常用到模型法和水量平衡法。在采用模型法时,需要输入大量参数进行订正,原理十分复杂,尤其开展大区域尺度研究的时候,计算程序更加繁杂。例如,苏常红等^[10]在采用 InVEST 模型对黄土高原地区产水量进行评价时,输入了大量参数对模型系数进行订正,虽然精度较高,但所需实测参数较多,计算繁琐。水量平衡法是大多数模型的基础原理,计算十分简便,然而在实际应用中,对于其中的蒸散量和径流量往往很难得到精确的计算。龚诗涵等^[14]利用了 MODIS 蒸散数据和基于气象站点的插值数据获取了蒸散量,在计算径流变化时采用了径流系数法,该方法在进行年径流的模拟时可以简单快速的得到研究区的多年平均径流水平。聂亿黄等^[7]利用地表能力平衡法结合遥感资料计算了陆地实际蒸散发量,采用 SCS 模型计算了地表径流量,该方法不失为有效研究水源涵养能力的方法。陈丽等^[15]利用 MODIS 蒸散数据产品结合 SCS 模型对黄淮海平原的耕地水源涵养功能进行了较好的评价。基于以上研究和本研究发现,SCS 模型作为模拟地表径流的经典方法,在很多地区都可以进行广泛应用^[25-31]。本文在计算研究区蒸散量时采用了 FAO 订正的 Penman-Monteith 公式,结果显示,在生长季内,位于长白山和大小兴安岭地区的森林蒸散要略低于研究区西部高原地区的草地及西南部、中部和东部的农田平原地区。由于研究方法的差异,研究区西部地区的蒸散结果要略高于周蕾^[38]和贺添^[39]的模拟结果,林地的蒸散量则较为稳定,数值较为接近。此外,在本研究中,我们采用 SCS 模型进行径流计算,在参数订正时选用了 Williams 等^[32]提出的 CN 值坡度订正公式,进而较好地揭示出东北地区在气候和地理因素影响下生长季内径流量的分布情况。目前,针对蒸散量和径流量的计算方法多样,采用何种方法可以精准地模拟出某类因子的变化及其影响作用仍有待进一步的探究。

应用不同的气象参数插值方法,会导致研究结果出现差异。本研究采用来自澳大利亚的 ANUSPLIN 插值方法,该方法是一种专门针对气象要素的样条插值方法,优点是可以引入协变量进行计算。我们主要引入了东北地区的海拔高度作为协变量,采用三变量局部薄盘光滑样条方法对东北地区及其周边共 124 个站点的降水和蒸散进行了插值,得到了 3 个典型气候年份的逐日的降水和蒸散资料。本研究中气象数据是从气象数据共享网的日值数据集中获取,在三江平原东北部地区的气象观测站点较少,缺少抚远等站点的气象数据,并且本文以日为尺度累计求和得到生长季内的总量,导致研究区东北部的局部地区出现了较高的插值结果。

5 结论

本文分析了东北地区 1980—2016 年的 SPEI 指数变化,选择出典型的干旱、正常和湿润年份,基于水量平衡法,结合 SCS-CN 模型以及 Penman-Monteith 方程对 3 个不同气候年份生长季内的水源涵养功能进行分析,得出以下结论:

(1) 在不同气候条件下,水源涵养功能呈现出空间一致性,即长白山地区水源涵养量最高,大小兴安岭地区次之;水源涵养量最低的区域出现在在研究区西部的呼伦贝尔草原地区以及东北三大平原的局部地区;水源涵养量一般的地方出现在以农田为主的东北平原区,如中部的松嫩平原、南部的辽河平原及东部的三江平原。

(2) 水源涵养功能主要受降雨的影响,呈显著正相关。2001 年为典型干旱年份,水源涵养总量为 2178.19 亿 m^3 ;2010 年为正常年份,水源涵养总量 3231.49 亿 m^3 ;2013 年为典型湿润年份,水源涵养总量为 3969.33 亿 m^3 。除此之外,水源涵养功能还受土地利用类型的影响,在水源涵养总量上表现为林地>农田>草地>湿地,整个生态系统内的平均水源涵养量在干旱年和正常年均表现为林地>农田>湿地>草地,而在湿润年份表现为林地>湿地>农田>草地。

参考文献 (References):

- [1] 欧阳志云, 郑华. 生态系统服务的生态学机制研究进展. 生态学报, 2009, 29(11): 6183-6188.
- [2] Ning J, Liu J Y, Zhao G S. Spatio-temporal characteristics of disturbance of land use change on major ecosystem function zones in China. Chinese Geographical Science, 2015, 25(5): 523-536.
- [3] 秦大河. 气候变化科学与人类可持续发展. 地理科学进展, 2014, 33(7): 874-883.
- [4] Ouyang Z Y, Zheng H, Xiao Y, Polasky S, Liu J G, Xu W H, Wang Q, Zhang L, Xiao Y, Rao E M, Jiang L, Lu F, Wang X K, Yang G B, Gong S H, Wu B F, Zeng Y, Yang W, Daily G C. Improvements in ecosystem services from investments in natural capital. Science, 2016, 352(6292): 1455-1459.
- [5] Zhang P C, Shao G F, Zhao G, Le Master D C, Parker G R, Dunning J B Jr, Li Q L. China's forest policy for the 21st century. Science, 2000, 288(5474): 2135-2136.
- [6] Xu W H, Xiao Y, Zhang J J, Yang W, Zhang L, Hull V, Wang Z, Zheng H, Liu J G, Polasky S, Jiang L, Xiao Y, Shi X W, Rao E M, Lu F, Wang X K, Daily G C, Ouyang Z Y. Strengthening protected areas for biodiversity and ecosystem services in China. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2017, 114(7): 1601-1606.
- [7] 聂忆黄. 基于地表能量平衡与 SCS 模型的祁连山水源涵养能力研究. 地学前缘, 2010, 17(3): 269-275.
- [8] 王玉纯, 赵军, 付杰文, 魏伟. 石羊河流域水源涵养功能定量评估及空间差异. 生态学报, 2018, 38(13): 4637-4648.
- [9] Fan M, Shibata H, Chen L. Spatial conservation of water yield and sediment retention hydrological ecosystem services across Teshio watershed, northernmost of Japan. Ecological Complexity, 2018, 33: 1-10.
- [10] Su C H, Fu B J. Evolution of ecosystem services in the Chinese Loess Plateau under climatic and land use changes. Global and Planetary Change, 2013, 101: 119-128.
- [11] 吕一河, 胡健, 孙飞翔, 张立伟. 水源涵养与水文调节: 和而不同的陆地生态系统水文服务. 生态学报, 2015, 35(15): 5191-5196.
- [12] 张彪, 李文华, 谢高地, 肖玉. 森林生态系统的水源涵养功能及其计量方法. 生态学报, 2009, 28(3): 529-534.
- [13] Wakode H B, Baier K, Jha R, Azzam R. Impact of urbanization on groundwater recharge and urban water balance for the city of Hyderabad, India. International Soil and Water Conservation Research, 2018, 6(1): 51-62.
- [14] 龚诗涵, 肖洋, 郑华, 肖焱, 欧阳志云. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素. 生态学报, 2017, 37(7): 2455-2462.

- [15] 陈丽, 郝晋珉, 陈爱琪, 李牧, 高阳, 管青春, 王宏亮. 基于二元水循环的江淮平原耕地水源涵养功能研究. 生态学报, 2017, 37(17): 5871-5881.
- [16] Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, Beguería S, Trigo R, López-Moreno J I, Azorín-Molina C, Pasho E, Lorenzo-Lacruz J, Revuelto J, Morán-Tejeda E, Sanchez-Lorenzo A. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(1): 52-57.
- [17] 赵秀兰. 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, 2010, 41(9): 144-149.
- [18] Yu M X, Li Q F, Hayes M J, Svoboda M D, Heim R R. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: 1951-2010? *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 545-558.
- [19] 徐一丹, 任传友, 马熙达, 赵冬妮, 陈伟. 基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析. 干旱区研究, 2017, 34(6): 1250-1262.
- [20] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. 基于 SPEI 指数的 1961-2014 年东北地区气象干旱时空特征研究. 生态学报, 2017, 37(17): 5882-5893.
- [21] 孙滨峰, 赵红, 王效科. 基于标准化降水蒸发指数(SPEI)的东北干旱时空特征. 生态环境学报, 2015, 24(1): 22-28.
- [22] 刘志红, Li L T, McVicar T R, Van Niel T G, 杨勤科, 李锐. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用. 气象, 2008, 34(2): 92-100.
- [23] 蔡福, 于慧波, 矫玲玲, 唐凯, 明惠青, 刘兵. 降水要素空间插值精度的比较——以东北地区为例. 资源科学, 2006, 28(6): 73-79.
- [24] Allen R G, Pereira L S, Raes D, Smith M. Crop Evapotranspiration-Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Rome: FAO, 1998.
- [25] Huang M B, Gallichand J, Wang Z L, Goulet M. A modification to the Soil Conservation Service curve number method for steep slopes in the Loess Plateau of China. *Hydrological Processes*, 2006, 20(3): 579-589.
- [26] Tiwari K, Goyal R, Sarkar A. GIS-based methodology for identification of suitable locations for rainwater harvesting structures. *Water Resources Management*, 2018, 32(5): 1811-1825.
- [27] 王瑾杰, 丁建丽, 张喆, 邓凯, 陈文倩, 张成. 奎屯河流域春季融雪期 SCS-CN 模型参数取值方法. 生态学报, 2017, 37(13): 4456-4465.
- [28] Ponce V M, Hawkins R H. Runoff curve number: has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering*, 1996, 1(1): 11-19.
- [29] USDA Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10. Washington, DC: USDA, 1985.
- [30] 史培军, 袁艺, 陈晋. 深圳市土地利用变化对流域径流的影响. 生态学报, 2001, 21(7): 1041-1049.
- [31] 陈正维, 刘兴年, 朱波. 基于 SCS-CN 模型的紫色土坡地径流预测. 农业工程学报, 2014, 30(7): 72-81.
- [32] Sharpley A N, Williams J R. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. USA Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1768. Washington, DC: USDA, 1990.
- [33] 丁程锋, 张绘芳, 李霞, 李伟涛, 高亚琪. 天山中部云杉天然林水源涵养功能定量评估——以乌鲁木齐河流域为例. 生态学报, 2017, 37(11): 3733-3743.
- [34] 张杰, 钱维宏, 丁婷. 东北地区 5-9 月降水特征和趋势分析. 气象, 2010, 36(8): 1-7.
- [35] 刘正佳, 于兴修, 王丝丝, 商贵铎. 薄盘光滑样条插值中三种协变量方法的降水量插值精度比较. 地理科学进展, 2012, 31(1): 56-62.
- [36] 税伟, 白剑平, 简小枚, 祁新华, 苏正安, 陈勇, 蔡应君. 若尔盖沙化草地恢复过程中土壤特性及水源涵养功能. 生态学报, 2017, 37(1): 277-285.
- [37] 周佳雯, 高吉喜, 高志球, 杨伟超. 森林生态系统水源涵养服务功能解析. 生态学报, 2018, 38(5): 1679-1686.
- [38] 周蕾, 王绍强, 陈镜明, 冯险峰, 居为民, 伍卫星. 1991 年至 2000 年中国陆地生态系统蒸散时空分布特征. 资源科学, 2009, 31(6): 962-972.
- [39] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988.