

锡林河流域水文干旱演变特征及影响因素分析

张璐, 朱仲元, 王慧敏, 王飞

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018)

摘要: 利用1982—2018年锡林浩特气象站和水文站的降水、气温、径流等数据,通过计算气象水文干旱指数,并采用交叉小波分析、累积距平、游程理论等方法探究锡林河流域水文干旱演变特征及主导因素。结果表明:1982—2016年,锡林河流域降水量与潜在蒸散发量呈逐年增加的趋势,而径流深则呈现逐年减小的趋势;锡林河流域上游区域夏季和冬季的旱情等级较高,自2000年以来,甚至出现夏季与冬季连旱的情况,故高温和低温均是可能引发锡林河流域干旱的重要原因;交叉小波分析发现,气象干旱与水文干旱的滞后关系会有所改变,不是所有区域都表现出水文干旱滞后于气象干旱;人类活动和气候变化在1990—1998年、1999—2016年对出现水文干旱的影响程度分别为67.7%、55.6%和32.3%、44.4%,呈逐年减小的趋势。

关键词: 水文干旱; 人类活动; 流域径流变化

中图分类号: P343.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)04-0178-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.04.027

Analysis of Hydrological Drought Evolution Characteristics and Influencing Factors in Xilin River Basin

ZHANG Lu, ZHU Zhongyuan, WANG Huimin, WANG Fei

(College of Water Resources and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018)

Abstract: Using precipitation, air temperature, and runoff data from Xilinhot Meteorological Station and Hydrological Station from 1982 to 2018, the meteorological and hydrological drought index was calculated, and cross-wavelet analysis, cumulative anomaly, and run length theory were used to explore the hydrological drought evolution characteristics and leading factors in the Xilin River Basin. The results showed that from 1982 to 2016, the rainfall and potential evapotranspiration in the Xilin River Basin increased year by year, while the runoff depth showed a decreasing trend in each year. Due to the high drought level in upper reaches of Xilin River Basin in summer and winter, and the continuous drought in summer and winter since 2000, the high temperature and low temperature were the important reasons that may cause drought in the Xilin River Basin. Cross wavelet analysis found that the lagging relationship between meteorological drought and hydrological drought will be somewhat change, not all regions show that hydrological drought lags behind meteorological drought. The impact of human activities and climate change on the occurrence of hydrological drought in 1990—1998 and 1999—2016 was 67.7%, 55.6% and 32.3%, 44.4%, with a decreasing trend year by year.

Keywords: hydrological drought; human activities; watershed runoff changes

河川径流是水资源主要的存在形式和组成部分,是社会经济发展和居民饮水的主要来源^[1]。随着国家经济的飞速发展,水资源短缺问题已经成为制约社会经济高速发展的重要因素,而在全球变暖与人类活动的双重影响下,水文干旱演变规律研究逐渐成为21世纪水科学研究的热点。其中,在我国水资源不足与社会经济发展已经严重失调的北方干旱半干旱

地区尤为突出^[2]。气候变化与人类活动对水文干旱的影响研究是多变量间的复杂关系^[3]。在表征干旱方面,水文干旱一般指地表水与地下水的异常偏少现象,其中,以径流角度识别水文干旱的研究晚于气象干旱和农业干旱,但却是联系气象干旱、农业干旱和社会经济干旱的纽带,是水文的极值现象^[4-5]。目前,国内外对气象干旱和农业干旱研究较多,而对水文干旱研究较

少。近几十年来,全球干旱半干旱地区部分河流的径流量呈明显减小的趋势,引起流域水资源的严重短缺,从而加剧了供需矛盾^[6-7]。在水文干旱影响因素研究方面,气候因素和人类活动是导致水文干旱的主要因素。

锡林河流域位于内蒙古锡林郭勒草原,是一条内陆河、重要的水源地和沿线居民的主要取水点,流域内的水资源状况直接影响当地农牧业生产和生态文明建设^[8]。近年来,由于自然资源的高强度开发利用,改变了流域的下垫面条件,造成流域水资源时空分布变化。2008—2011 年期间,接连几年枯水年的出现,促使我国北方发生特大干旱灾害。流域中下游地区干旱频发,流域断流现象日益严重,生态系统异常脆弱^[9]。因此,重点探究锡林河流域上游水文干旱演变特征及影响因素,对保护草原和湿地生态安全具有重要意义。

1 研究区概况

锡林郭勒草原位于内蒙古自治区中东部,是中国四大草原之一。草原面积 17.96 万 km²,草原类型复杂,保存较为完好,生物多样性丰富,是温带草原中具有代表性和典型性的草原,是华北地区重要的生态屏障,同时也是距首都北京最近的草原牧区。锡林河,蒙语称锡林郭勒,属锡林郭勒草原上一条内陆河,河水发源于赤峰市克什克腾旗境内,自东南流向西北,最终自然消失在查干诺尔湿地,经纬度分别为 115°18′—117°08′E 和 43°02′—44°57′N,本文的研究区位于锡林浩特市锡林河水库上游的锡林河水文站(43°29′N,116°09′E)所控制的流域上游区域。研究区地处中纬度西风气流带内,属中温带半干旱大陆性气候,年均降水量为 121.12~511.71 mm,无霜期 110 d,利用 FAO 提出的 Penman-Monteith 公式计算锡林河流域潜在蒸散发,得出年均潜在蒸散发量为 1 105.62 mm,最小潜在蒸散发量为 978.21 mm,最大潜在蒸散发量为 1 243.51 mm。

2 材料与方法

2.1 数据来源

气象数据选用 1982—2016 年锡林河流域唯一个国家气象站——锡林浩特站的逐日降水量、气温和平均风速等气象数据,气象数据资料来源于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>),数据均满足研究的精度要求。锡林河水文站(43°29′N,116°09′E)位于锡林河流域的中上游段,作为流域总的出口断面,锡林河水文站出口的径流量基本代表了该区域水资源的总量。

2.2 研究方法

2.2.1 气象干旱指数 标准化降水指数(SPI)的计算仅考虑降水因素,简单易行,且具有多时间尺度。具体计算原理与内容参见参考文献[10]。目前,许多

研究^[11]已经充分认识到温度升高会影响干旱的严重程度。标准化降水蒸发蒸腾指数(SPEI)是基于 SPI 指数在 2010 年首次被 Vicente-Serrano 等^[12]提出。

SPEI 的计算基于潜在蒸散发和降水的差额,不仅考虑到温度对干旱的影响,而且更加客观地描述地表干湿变化,适用于气候变暖背景下干旱特征的分析^[13]。本文基于 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发(PET),并计算气候水分平衡(BAL),即:

$$D_i = P_i - PET_i \tag{1}$$

式中: D_i 为降水量与蒸散量的差(mm); P_i 为降水量(mm); PET_i 为潜在蒸散量(mm)。

对 D_i 数据序列进行正态化。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值,所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 Log-logistic 概率分布。Log-logistic 概率分布的累积函数为:

$$F(x) = I + \left[\left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^\beta \right] - 1 \tag{2}$$

式中:参数 α, β, γ 分别采用线性矩估计方法拟合获得:

$$\alpha = \frac{(\omega_0 - 2\omega_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)} \tag{3}$$

$$\beta = \frac{2\omega_1 - \omega_0}{6\omega_1 - \omega_0 - 6\omega_2} \tag{4}$$

$$\gamma = \omega_0 - \alpha \cdot \Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \tag{5}$$

式中: Γ 为阶乘函数; $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 为原始数据序列 D_i 的概率加权矩。计算方法为:

$$\omega_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i, F_i = \frac{i - 0.35}{N} \tag{6}$$

式中: N 为参与计算的月份数。

然后对累积概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \tag{7}$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$SPEI = \omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3}, \omega = \sqrt{-2\ln(P)} \tag{8}$$

式中: $c_0 = 2.515\ 517, c_1 = 0.802\ 853, c_2 = 0.010\ 328, d_1 = 1.432\ 788, d_2 = 0.189\ 269, d_3 = 0.001\ 308$ 。

当 $p > 0.5$ 时,以 $1 - P$ 表示 P :

$$SPEI = - \left(\omega - \frac{c_0 + c_1\omega + c_2\omega^2}{1 + d_1\omega + d_2\omega^2 + d_3\omega^3} \right) \tag{9}$$

SPEI 具有多尺度、多空间比较的特征,根据中国气象局制定的气象干旱等级划分标准^[14],将 SPEI 划分为 5 个等级,分别为无旱(> -0.5)、轻微干旱 $[-0.5, -1.0)$ 、中等干旱 $[-1.0, -1.5)$ 、严重干旱 $[-1.5, -2.0)$ 和极端干旱(≤ -2)。

2.2.2 标准化径流干旱指数 SRI 可以综合反映水文气象过程和径流变化产生的滞后现象。计算方法由 SPI 指数演变而来^[15]。本文以每日实测径流深数

据为基础利用分布概率密度函数描述多年径流深的变化,并计算出不同时间尺度的 SRI 值。经过标准正态化将呈偏态概率分布的值转化为不同时间尺度的 SRI 值。具体计算方法为:

假设某一时间段的径流 x 满足 Γ 分布概率密度函数 $f(x)$ 为:

$$f(x)=\frac{1}{\gamma T(\beta)}X^{\beta-1}e^{\frac{-x}{\lambda}}\tag{10}$$

式中: γ 、 β 分别为形状和尺度参数。

$x>0,\gamma>0,\beta>0,\gamma,\beta$ 可用极大似然法计算,一定时间尺度径流 x 的累积概率^[16]为:

$$f(x)=\int_0^xf(x)dx\tag{11}$$

对 Γ 分布概率进行正态标准化得到:

$$SRI=S\frac{t-(c_2t+c_1)t+c_0}{((d_3t+d_2)t+d_1)t+1}\tag{12}$$

$$t=\sqrt{2\ln(F)}\tag{13}$$

当 $F>0.5$ 时, $S=1$; 当 $F\leq 0.5$ 时, $S=-1$, 其中 $c_0=2.515\ 517,c_1=0.802\ 385\ 3,c_2=0.010\ 328,d_1=1.432\ 788,d_2=0.189\ 269,d_3=0.001\ 308$ 。

选用以月为尺度的 SRI 指数(SRI-1)研究气象干旱与水文干旱的关系,并分析水文干旱对气象干旱的响应。根据 SPI 指数将 SRI 丰枯等级划分为 9 个等级^[17],分别为特涝(>2.0)、重涝($1.5,2.0$]、中涝($1.0,1.5$]、轻涝($0.5,1.0$]、正常($0.5,-0.5$)、轻旱($-0.5,-1$)、中旱($-1.0,-1.5$)、重旱($-1.5,-2.0$)和特旱(≤ -2)。

2.2.3 干旱强度 《气象干旱等级》中关于气象干旱发生强度的诠释为所有天或月的综合气象干旱指数值在干旱过程内为轻度以上的干旱等级之和。

$$S_{ij}=\sum_{i=1}^mSRI_i\tag{14}$$

式中: j 为年份; i 为不同站号; m 为发生干旱的站数; $|SRI_i|$ 为 j 年 i 站发生干旱时 SRI 的绝对值。

2.2.4 干旱频率 用于评价某站在某时段干旱发生的次数。

$$F_i=(n/N)\times 100\%\tag{15}$$

式中: i 为不同站号; n 为该站实际发生干旱的年数; N 为 i 站多年发生干旱的总年数。

2.2.5 SCRAQ 法 SCRAQ 是基于变异点识别的基础上,以时间为自变量,径流、降水和蒸发的累积量为因变量,根据不同时段径流、降水和蒸发累积斜率差值,计算降水、蒸发和人类活动对径流的影响,具体计算步骤见参考文献[18-19]。

3 结果与分析

3.1 水文干旱变化特征

3.1.1 SRI 对水文干旱的识别 根据 SRI 干枯等级临界值,绘制锡林河流域 1982—2016 年来春、夏、秋、

冬季干旱等级分布状况(图 1)。从图 1 可以看出,1991 年以前,春季和冬季锡林河流域的水文干旱较为频繁;2000 年以后,春、夏、冬季均有干旱出现,甚至出现夏季与冬季连旱,2005—2007 年和 2009—2012 年出现夏季连旱;2001—2002 年、2005—2007 年和 2009—2011 年出现冬季连旱。在 2009 年附近的冬季与春季出现重旱及以上的旱灾;2013 年夏季发生了中旱。进一步将 SRI 识别的干旱程度与锡林河流域已有干旱研究文献记载的干旱事件进行对比,可知与张立伟^[20]对锡林浩特市干旱灾害统计分析中得到的结论相一致。因此,从已识别到的干旱年份和等级来看,SRI 对锡林河流域的水文干旱识别具有一定的合理性。

3.1.2 干旱发生次数和干旱强度 本研究采用游程理论统计了历年锡林河流域水文干旱发生次数和干旱强度,并与降水量进行对比分析,旨在探究其内在变化规律。从图 2 可以看出,干旱发生次数与干旱强度随着降水的增加而减小,1982—1985 年附近,干旱发生次数与干旱强度呈平稳的变化趋势,并在 1985 年开始减小;1992—1993 年降水持续增加,干旱发生次数与干旱强度微小的可忽略不计;自 2000 年以来,由于降水、潜在蒸散发等因素的波动幅度增加,干旱发生次数和干旱强度随之增长,在 2001 年干旱发生次数高达将近 8 次,2009 年干旱强度达到历年峰值接近于 9,干旱次数与干旱强度经历大约 1~3 年的增大后发生突减的现象;2012 年降水量增大,潜在蒸散发减小,干旱发生次数及干旱强度呈显著下降趋势。焦玮等^[21]的研究表明,锡林河流域自 2000 年后,潜在蒸散发和人类活动对径流深的变化产生较大的影响,与本文的结果相似。

3.2 气候因子对水文干旱的影响

3.2.1 降水、潜在蒸散发和径流变化特征 锡林浩特气象站 1982—2016 年降水量年际变化趋势及 5 年滑动平均特征见图 3。由图 3 可知,总体上降水量呈线性增长趋势,增长率为 9.46 mm/10 a,多年平均降水量为 272.75 mm,最大为 511.71 mm,最小为 121.12 mm。在 1982—2000 年波动幅度小且具有很好的周期性,平均每 5 年为 1 个小周期;从 5 年滑动平均线来看,降水量在这期间呈先增加后减小的趋势,2000—2012 年,降水量为先减小后增加的波动变化,2012 年降水量大幅增加,此后降水增加趋势明显提升。

利用锡林浩特站平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、日照时数、平均风速等日数据,采用 1998 年修正的 Penman-Monteith 公式估算 1982—2016 年逐日潜在蒸散发量。由图 3 可知,年际潜在蒸散发量从整体上呈现明显增长态势,增长率为 28.56 mm/10 a。多年

平均潜在蒸散发量为 1 105.57 mm,最小为 978.20 mm,最大为 1 228.81 mm。从 5 年滑动平均线来看,1982—

1990 年潜在蒸散发波动较小,1990—2016 年潜在蒸散发有一个明显的减少—增加—减小的大周期。

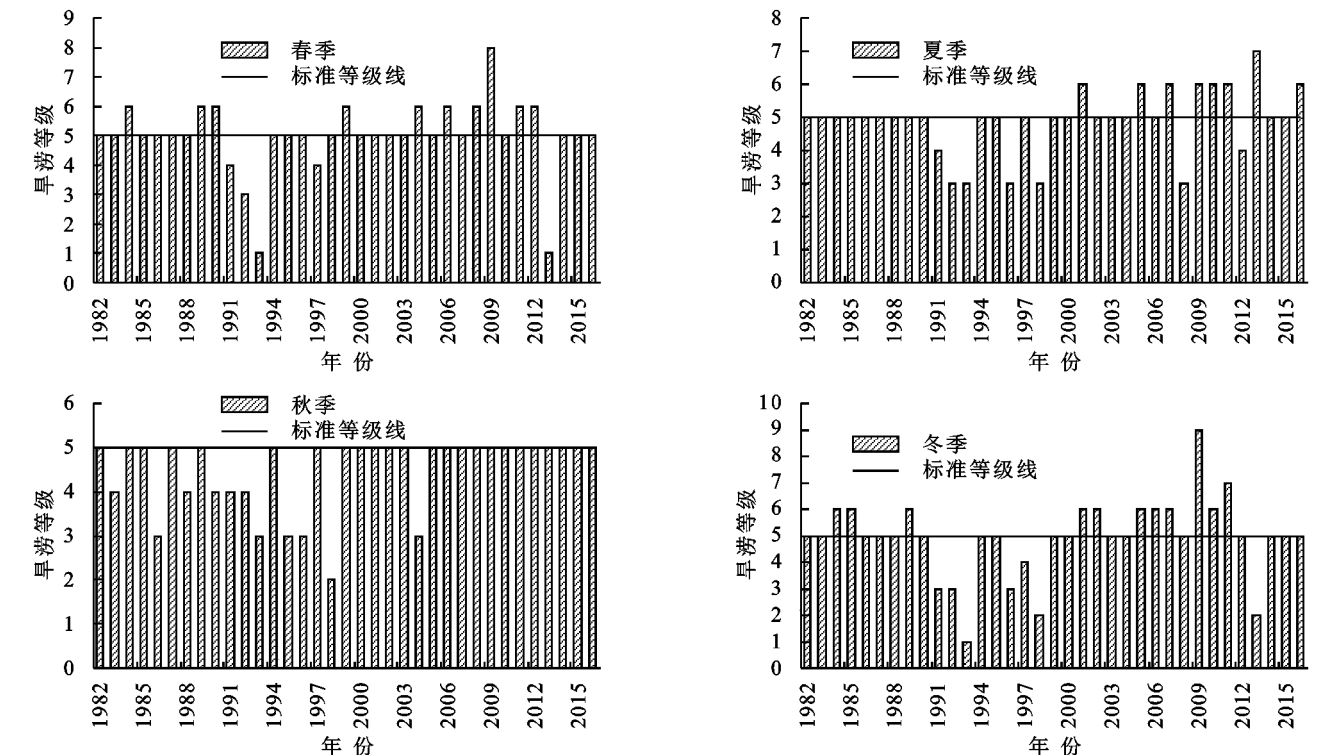


图1 锡林河流域 1982—2018 年不同季节干旱等级变化趋势

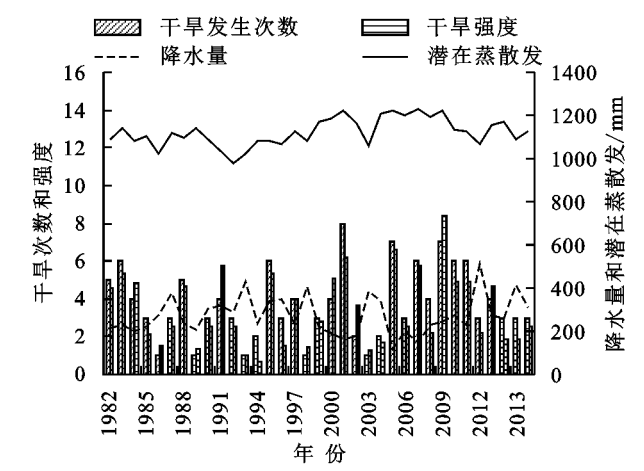


图2 锡林河流域干旱强度、干旱发生次数与降水、潜在蒸散发分布

锡林浩特水文站 1982—2016 年径流深年际变化整体呈现较明显的下降趋势,下降率为 16.64 mm/10 a,多年平均径流深为 181.19 mm,1993 年均径流深最大,为 491.92 mm,2009 年平均径流深最小,为 28.29 mm。由图 3 可知,在 1982—1990 年径流深平稳变化,没有出现较大的波动,1990—2016 年径流深的 5 年滑动平均值曲线显示,径流深呈增加—减小—增加的趋势变化。

3.2.2 气象水文干旱指数的变化趋势分析 通过计算锡林河流域年尺度的 SRI、SPI 和 SPEI,对比分析水文干旱与气象干旱变化特征,进而研究气候变化对水文干旱的影响。本研究计算了锡林河流域年尺度

的 SRI、SPI 和 SPEI,对比分析气象干旱对水文干旱的影响。结果表明,历年 SRI 呈现出微弱的下降趋势,在 2010 年附近出现连续干旱现象,直到 2012 年 SRI 才有所回升。SPI 与 SRI 的变化趋势较为一致,在 90~10 年代,SPI 与 SRI 的变化与 SPEI 出现不一致现象,说明降水径流相关性极高,并且指数并没能识别到气温对干旱的影响(图 4)。

3.2.3 水文干旱演变的气象因子驱动力分析 锡林河流域径流深呈逐年下降的趋势,为进一步探究造成水文干旱的原因,采用交叉小波法,选取气象干旱指数 SPI 与 SPEI,对锡林河流域水文干旱变化的气象驱动因子进行了分析,图 5 和图 6 为 SPI、SPEI 与 SRI 的交叉小波关系图谱。

图 5 和图 6 中碗状细黑色曲线为小波影响的有效谱值区;有效谱值区内粗黑线为显著性水平 95% 的置信区间;箭头表示相位差,箭头向右表示两时间序列关系处于正相位,箭头向左表示两时间序列关系处于负相位,箭头向上表示气象干旱指数变化超前水文干旱指数变化 3 个月,箭头向下表示气象干旱指数变化落后干旱指数变化 3 个月。加深的颜色表示不同的小波变换系数,颜色处于颜色带的位置越靠上意味着相关性越高。

SPI 是采用单一因子表征的气象干旱指数,是学者们研究干旱应用广泛的干旱指数。由图 5 可知, SPI 与 SRI 在 1982—1987 年有周期为 4~8 年的正

相关关系,在 2008—2012 年有周期为 3~4 年的正相关关系,且可以明显看出 SRI 滞后于 SPI。

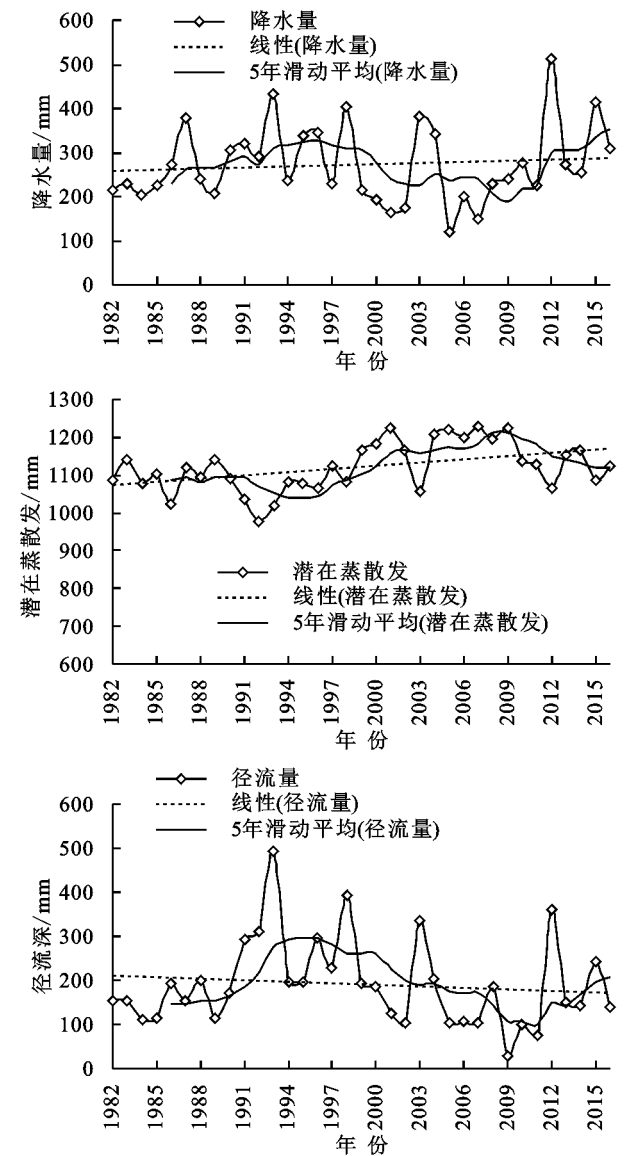


图 3 1982—2016 年锡林浩特站气象水文变化特征

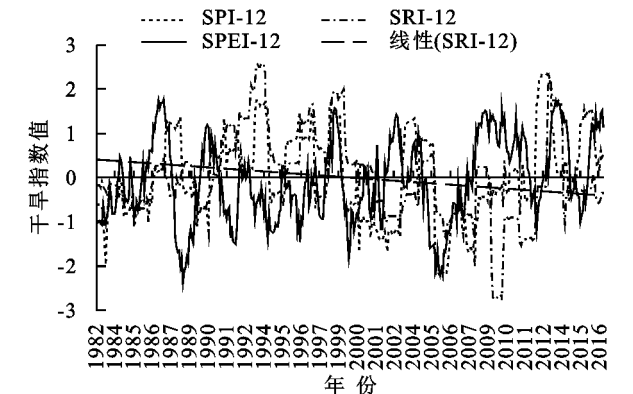


图 4 锡林河流域历年气象水文干旱变化过程

SPEI 是结合降水和潜在蒸散发的气象干旱指数, SPEI 与 SRI 存在一些较强的共振周期,相关性有正相关也有负相关,在 1982—1990 年有周期为 4~8 年的负相关关系,且 SRI 滞后于 SPEI;在 2007—2016 年有多个周期为 4~6 年的正、负相关关系,在

正相关中, SRI 滞后于 SPEI, 在负相关中, SPEI 滞后于 SRI。总而言之, 气象干旱与水文干旱的滞后关系有所改变, 不是所有区域都表现出水文干旱滞后于气象干旱。对比分析, SPEI 所代表的综合降水和潜在蒸散发的指数是水文干旱演变的主要驱动力。

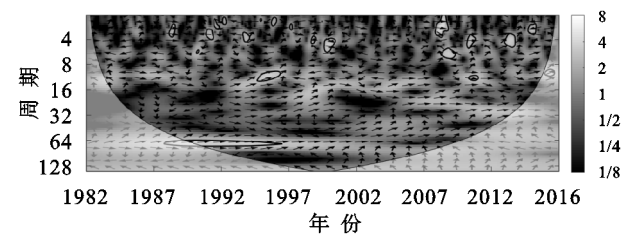


图 5 SPI 与 SRI 月尺度的交叉小波关系图谱

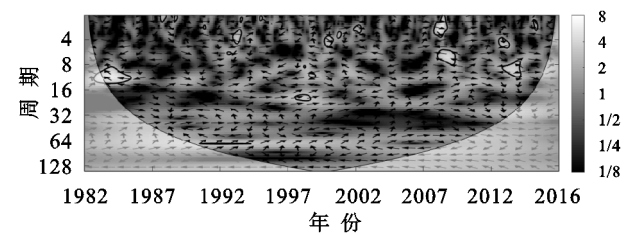


图 6 SPEI 与 SRI 月尺度的交叉小波关系图谱

3.3 定量估算气候变化和人类活动对水文干旱贡献

3.3.1 研究阶段划分 有研究^[21]显示,锡林河流域从 20 世纪 80 年代开始,人口、城市化及城镇用地面积等的增长不断加快,因此,针对 1982—2016 年人类活动对水文干旱的影响展开研究。年降水量和径流深的标准化序列累积距平曲线显示(图 7 和图 8),径流在 1990 年、1998 年出现拐点,降水量在 1998 年、2012 年和 2014 年出现拐点,在 1990 年为径流出现的第 1 个拐点,而此时降水量并没有出现拐点,表明此时段径流的突变是由人类活动引起的。在 1998 年降水与径流均出现拐点,说明降水的变化导致径流的变化。根据人类活动期径流的拐点,本文将人类活动期划分为 3 个研究阶段:1982—1989 年为人类活动影响的第 1 阶段(T1);1990—1998 年为人类活动影响的第 2 阶段(T2);1999—2016 年为人类活动影响的第 3 阶段(T3)。有研究^[22]表明,研究区自 1985 年以来其实际载畜量超出天然草地的承载能力。统计显示,研究区范围内牲畜总量在近 20 年间几乎增加 2 倍。不合理的人类活动引起流域植被的退化,降低地表对降雨径流的缓冲拦蓄作用,加速水土流失,促使水文干旱加剧^[23]。1982 年“双权一制”建立;1989 年沙地植被面积增加^[24];2000 年开始,锡林郭勒盟开展了一系列生态保护工作,采取了“退耕还林还草”“围封禁牧”“天然林保护工程”等一系列水土保持措施^[25]。因此将人类活动期划分为 3 个研究阶段是合理的。

3.3.2 各阶段气候变化和人类活动对水文干旱演变的贡献率 根据径流、降水和潜在蒸散发累积量斜率

定量估算和分析人类活动在不同阶段对径流变化的影响。结果(表 1 和图 9)表明,对锡林河流域径流、降水和潜在蒸散发序列绘制其不同阶段的累积量与年份的线性关系图,拟合出的各要素累积值与年份之间的相关性较高,均在 98%以上,说明 98%的部分都可以得到合理的解释,误差部分为 2%。

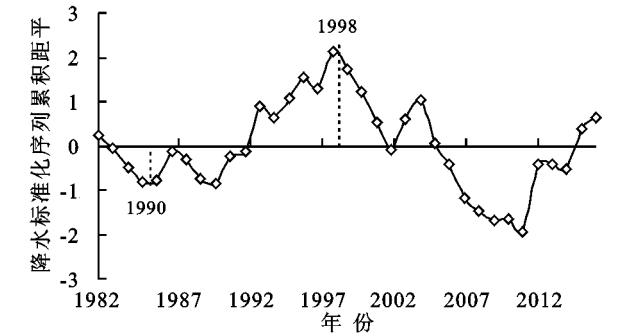


图 7 年降水标准化序列累积距平曲线

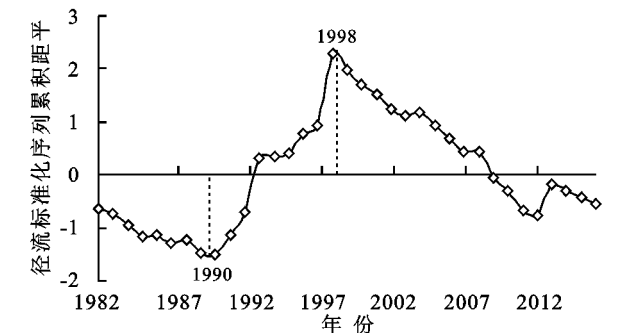


图 8 年径流标准化序列累积距平曲线

表 1 径流、降水和潜在蒸散发累积量斜率改变率统计			
影响因素	时间段	累积量斜率	改变量
径流	1982—1989	0.1476	—
	1990—1998	0.2918	0.1442
	1999—2016	0.1345	-0.1573
降水	1982—1989	0.2593	—
	1990—1998	0.3212	0.0619
	1999—2016	0.2582	-0.0630
潜在蒸散发	1982—1989	0.1092	—
	1990—1998	0.1176	0.0084
	1999—2016	0.1125	-0.0051

与第 1 阶段(1982—1989 年)相比,1990—1998 年降水对径流变化的贡献率为 24.4%,潜在蒸散发对径流变化的贡献率为 7.9%;1999—2016 年降水对径流变化的贡献率为 36.4%,潜在蒸散发对径流变化的贡献率为 8.0%。本研究不设有基准期,仅单独分析相邻阶段不同因素对径流的影响特征。1982—2016 年径流、降水和潜在蒸散发阶段性变化呈现增加—减少的趋势,且降水和潜在蒸散发对径流变化均产生正贡献。人类活动在 1990—1998 年、1999—2016 年对径流的影响程度为分别为 67.7%和 55.6%,气候变化对径流变化的贡献率分别为 32.3%和 44.4%(表 2)。

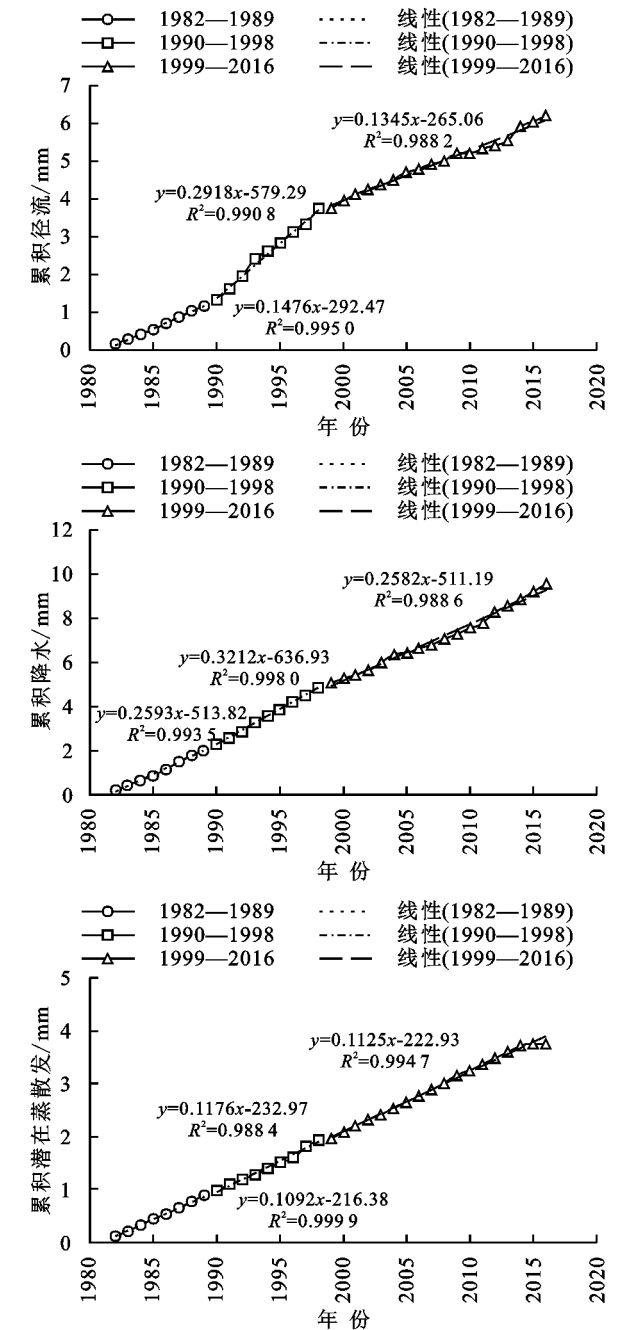


图 9 锡林河流域 1982—2016 年累积径流、降水和潜在蒸散发变化特征

表 2 不同阶段气候变化和人类活动对径流的贡献率				
单位: %				
时期 (T)	降水 贡献率	潜在蒸散发 贡献率	气候变化 贡献率	人类 活动
1990—1998	24.4	7.9	32.3	67.7
1999—2016	36.4	8.0	44.4	55.6

锡林河流域以草地为主,植被覆盖面积较大,人口不集中,该区域受人类活动的影响相对较小。在 1990—2016 年,降水和潜在蒸散发对径流的贡献呈增加趋势,人类活动对径流的贡献率呈减小趋势。人类活动对径流的贡献率已经超过 50%,在 90s 后期人类活动对径流的影响达到最大,2000 年后期,人类活动对径流的影响逐渐缓和。锡林河流域 1982—

2016 年年均降水量为 272.75 mm, 年均潜在蒸散发量为 1 122.12 mm, 水量年内分配不均匀, 导致水资源严重短缺。1990—1998 年年均降水量为 322.21 mm, 年均潜在蒸散发量为 1 061.98 mm, 1999—2016 年年均降水量仅为 258.82 mm, 年均潜在蒸散发量为 1 162.92 mm, 降水量在人类活动的第 3 阶段较低, 促使人类生产活动的取用水量减小, 故第 3 阶段的人类活动贡献率也较低。

4 结论与讨论

总体来看, 1982—2016 年, 锡林河流域降水与潜在蒸散发呈逐年增加的趋势, 而径流量则呈现逐年减小的趋势, 周期性明显。由于锡林河流域为典型的融雪型径流, 近年来, 在全球变暖的气候背景条件下, 径流周期缩短, 峰值减小。

自 2000 年以来, 春、夏和冬季均有干旱出现, 甚至出现夏季与冬季连旱的情况, 夏季和冬季的旱情等级较高, 由此看来, 高温和低温均是可能引发锡林河流域干旱的重要原因; 锡林河流域水文干旱的发生次数和干旱强度经历大约 1~3 年的增大后, 会产生突减的现象。

历年 SRI 呈现出微弱的下降趋势, 说明锡林河流域的径流深将逐年减小进而引发水文干旱。一定程度上, 出现水文干旱滞后于气象干旱的现象。进一步进行交叉小波分析发现, 气象干旱与水文干旱的滞后关系有所改变, 不是所有区域都表现出水文干旱滞后于气象干旱。对比 2 个不同的气象干旱指数, SPEI 所代表的综合降水和潜在蒸散发的气象干旱指数是水文干旱演变的主要驱动力。

根据径流、降水和潜在蒸散发累积量斜率定量估算和分析人类活动在不同阶段对径流变化的影响可知, 1982—2016 年径流、降水和潜在蒸散发阶段性变化呈现增加—减少的趋势, 且降水和潜在蒸散发对径流变化均产生正贡献。人类活动在 1990—1998 年、1999—2016 年对水文干旱的影响程度为分别为 67.7%、55.6%, 气候变化对水文干旱变化的贡献率分别为 32.3%、44.4%。

利用标准化径流指数的方法对区域水文干旱进行识别, 在一定程度上便于对干旱的分级, 但是样本的一致性及平稳性很难保证。因此, 在水文干旱的研究上, 建立综合性水文干旱指标, 即考虑人类活动、降水、蒸散发、土壤特性及地下水等因素或者与其他 3 种干旱相结合, 建立能反映水文干旱形成机制并提出更有效实用的综合性干旱指标, 反映干旱状况, 从而减少结果的不确定性。分布式水文模型能更准确描述水文过程的机理, 并能有效地利用 GIS 和 RS 提供

的大量空间信息。本文在利用 SCRAQ 法计算降水、蒸发和人类活动对径流的影响时, 由于研究区降水分配不均匀, 采用了潜在蒸散发量, 因此, 计算精度有待进一步提高。

参考文献:

- [1] 曹巍. 陕北榆林地区河川径流变异类型识别方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [2] 李淑芳, 杨建英, 陈琳, 等. 半干旱黄土区降水和气温对北川河径流的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(4): 18-23.
- [3] 杨立哲, 钱虹, 郝璐. 锡林河近 50 年径流变化特征及其影响因素分析[J]. 草业科学, 2015, 32(3): 303-310.
- [4] 耿鸿江, 沈必成. 水文干旱的定义及其意义[J]. 干旱地区农业研究, 1992, 10(4): 91-94.
- [5] 周洪华, 王云倩, 方功焕, 等. 标准化径流指数在阿克苏河水文干旱特征识别中的应用[J]. 水资源与水工程学报, 2019, 30(2): 6-11, 18.
- [6] 张建云, 王国庆, 贺瑞敏, 等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158.
- [7] 刘彩红, 朱西德, 白彦芳. 近 50 年来黄河源区流量对气候变化的响应及其未来变化趋势预测[J]. 资源科学, 2011, 33(7): 1236-1241.
- [8] 宋小园, 朱仲元, 焦玮, 等. 数字滤波法在锡林河基流分割中的比较与应用[J]. 干旱区地理, 2016, 39(6): 1319-1326.
- [9] 赵晓英. 锡林郭勒草原退化和干旱原因解析[J]. 农业灾害研究, 2018, 8(4): 19-20.
- [10] Zarch M A A, Sivakumar B, Sharma A. Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI) [J]. Journal of Hydrology, 2015, 526: 183-195.
- [11] 王慧敏, 郝祥云, 朱仲元. 基于干旱指数与主成分分析的干旱评价: 以锡林河流域为例[J]. 干旱区研究, 2019, 36(1): 95-103.
- [12] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lopez-Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [13] 张煦庭, 潘学标, 徐琳, 等. 基于降水蒸发指数的 1960—2015 年内蒙古干旱时空特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 190-199.
- [14] 中国气象科学研究院, 国家气象中心, 中国气象局预测减灾司. GB/T 20481—2017 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(2). doi: 10.1029/2007GL032487.
- [16] Kingtse C M. Model-Based drought indices over the United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9. doi: 10.1175/2008JHM1002.1.

增加土壤硝态氮累积量^[19],从而增加了 VC 含量。

4 结论

田间试验结果表明,添加 DY—ET100 对番茄叶片中叶绿素含量无影响,但有利于增加番茄果实中 VC 含量。在掺沙黏土和黏土中添加 DY—ET100 的 T2 处理较 T1 处理含量增加 12.50% 和 20.51%。DY—ET100 能促进水分在土壤中的横向运移,其在掺沙黏土中的作用效果优于黏土中,灌溉结束后,添加 DY—ET100 的 T2 处理在掺沙黏土中水分横向运移半径较 T1 和 T3 处理显著增加 22.53%和 12.33%,同时增加 0—30 cm 土层的土壤质量含水量。DY—ET100 还能减少硝态氮在土壤中的下渗,使 0—30 cm 土层硝态氮含量增加,且分布更加均匀;灌溉后在掺沙黏土和黏土中,硝态氮集中分布区域内,T2 处理较 T1 和 T3 处理硝态氮含量分别增加 3.33%,3.85%和 7.73%,10.18%。收获期时添加 DY—ET100 增加硝态氮在 0—50 cm 土层内的累积量,在掺沙黏土和黏土中 T2 处理较 T1 处理硝态氮累积量增加 41.22%和 18.86%;同时减少硝态氮在 50 cm 以下土层的淋溶损失量,损失量分别降低 7.53%和 8.07%。

参考文献:

[1] 夏远平,江波,洪江,等.我国水资源研究现状及评价方法进展[J].南方论坛,2018(9):11,27.

[2] 王克六.我国淡水资源的利用现状及对策[J].南方农业,2015(9):239-242.

[3] 蔺宇.浅谈我国水污染的现状及危害[J].节能环保,2018(1):9.

[4] 董章杭,李季,孙丽梅.集约化蔬菜种植区化肥施用对地下水硝酸盐污染影响的研究:以“中国蔬菜之乡”山东省寿光市为例[J].农业环境科学学报,2005,24(6):1139-1144.

[5] 陶婷.不同滴灌施肥方式下土壤硝态氮分布及棉株氮素利用率的研究[D].新疆 石河子:石河子大学,2015.

(上接第 184 页)

[17] 张强,邹旭凯,肖风劲.GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006.

[18] 王随继,李玲,颜明.气候和人类活动对黄河中游区间产流量变化的贡献率[J].地理研究,2013,32(3):395-402.

[19] 白乐,李怀恩,何宏谋.降水和人类活动对秃尾河流域基流的影响[J].自然资源学报,2014,29(12):2078-2088.

[20] 张立伟.近 50 年锡林浩特市降水量变化特征及干旱灾害统计分析[J].内蒙古气象,2018(3):33-35.

[21] 焦玮,朱仲元,宋小园,等.近 50 年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):12-19.

[6] 陈英旭.农业环境保护[M].北京:化学工业出版社 2007:166-167.

[7] 陈瑶,张科利,罗利芳,等.黄土坡耕地弃耕后土壤入渗变化规律及影响因素[J].泥沙研究,2005(5):45-50.

[8] 李卓,刘永红,杨勤.土壤水分入渗影响机制研究综述[J].灌溉排水学报,2011,30(5):124-128.

[9] 徐明霞.未来营销新技术设施农业滴灌养分调控灌溉汇总[EB/OL].[2017-09-02](2019-12-14).<https://wk.baidu.com/view/e5bfe0090a4e767f5acfa1c7aa00b52acec79c43?fromShare=1&fr=cop©fr=cop©linkpop>.

[10] 鲍士旦.土壤农化分析[J].北京:中国农业出版社,1999:352-359.

[11] 李合生.植物生理生化实验原理与技术[J].北京:高等教育出版社,2000.

[12] 殷紫,常庆瑞,刘森,等.基于光谱指数的不同生育期油菜叶片 SPAD 估测[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(5):66-72.

[13] 韦彦,孙丽萍,王树忠,等.灌溉方式对温室黄瓜灌溉水分配及硝态氮运移的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):67-72.

[14] 杨越.黑土不同耕层厚度对作物养分吸收及根系分布的影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2018.

[15] 武钰.干旱区幼龄枣树不同灌溉方式下土壤水分运移规律研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2015.

[16] 王超.水肥一体化对番茄生理及水氮利用效率的影响[D].北京:中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,2019.

[17] 李若楠,武雪萍,张彦才,等.节水减氮对温室土壤硝态氮与氮素平衡的影响[J].中国农业科学,2016,49(4):695-704.

[18] 任慧勤.一种液体土壤水分调节剂在马铃薯品种“Innovator”上的应用[J].马铃薯产业与现代可持续农业,2015:4.

[19] 吴洮男,郁继华,张国斌,等.不同灌水上限和施肥量对温室番茄产量与品质的影响[J].西北植物学报,2018,38(11):2090-2100.

[22] 姜晔,毕晓丽,黄建辉等.内蒙古锡林河流域植被退化的格局及驱动力分析[J].植物生态学报,2010,34(10):1132-1141.

[23] 李玉兰,贾国华.锡林河水库水土流失现状及成因分析[J].安徽农学通报,2012,18(21):185-188.

[24] 韩砚君,牛建明,张庆,等.锡林河流域近 30 年草原植被格局动态及驱动力分析[J].中国草地学报,2014,36(2):70-77.

[25] 锡林郭勒盟党史地方志编纂委员会办公室.锡林郭勒年鉴[M].呼和浩特:内蒙古出版集团内蒙古文化出版社,2016:80.