

文章编号:0559-9350(2020)05-0556-13

区域雨水资源化潜力计算及时空分布规律研究

孟凡香^{1,4}, 李天霄^{1,2,3}, 付 强^{1,2,3}, 刘 东^{1,2,3}, 杨丽妍¹

(1. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;

3. 东北农业大学 黑龙江省寒区水资源与水利工程重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150030;

4. 黑龙江农垦勘测设计研究院, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘要: 为充分利用雨水资源应对区域水资源紧缺问题,以黑龙江省松嫩平原为研究区,考虑地下水补给量和基流量对雨水资源化潜力的影响,引入分布式水文模型SWAT,提出了适用于研究区的雨水资源化潜力计算模型,计算了研究区的雨水资源化潜力,分析了研究区雨水资源化潜力时空分布规律。结果表明:研究区雨水资源化潜力在时间和空间上均存在一定差异,各分区之间以及同一分区不同年份雨水资源化潜力及其构成也存在较大的差异;生育期多年平均可利用雨水资源化潜力为343.78亿m³,占生育期多年平均雨水总量的50.28%;各分区产流量在雨水资源化潜力中占比均较大,建议要注重提高降水径流汇集、径流蓄存和集雨补灌等相关技术;在土壤水增量占比大的分区要注重节水灌溉技术的应用。总体来看,黑龙江省松嫩平原地区雨水资源化潜力巨大,应该科学合理提高雨水资源利用率,保障区域农业可持续发展。

关键词: 松嫩平原; 雨水资源化潜力; SWAT模型; 时空分布规律

中图分类号: P333.2

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20200061

1 研究背景

近年来,气候变化和人类活动对自然水文过程造成了较大影响^[1],产生了水资源短缺、水土流失等一系列问题,已经成为制约区域经济和生态环境可持续发展的重要因素。雨水资源是可利用的淡水资源,科学合理的开发和利用雨水资源,一方面可以增加土壤入渗,涵养土壤水库,消除水土流失的原动力,缓解区域干旱缺水现象^[2],另一方面对于修复和促进自然界水循环^[3]、解决全球性水资源紧缺和水危机具有重要的理论价值。因此,如何科学合理的计算和分析区域雨水资源化潜力引起了国内外学者及政府部门的广泛关注^[4-6]。

自1980年代起相关学者就开始逐步对雨水资源化潜力的理论与应用等方面进行研究,如:李武彦等^[7]从提高天然降水利用的角度研究了豫西地区雨水拦蓄措施对作物增产的影响;郑宝宿^[8]以我国干旱缺水 and 水土流失严重的甘肃省为研究对象,分析了甘肃省雨水资源化及其利用的可行性,在此基础上提出了雨水积蓄利用技术体系和甘肃省雨水蓄积利用实践模式;Karen lies^[9]从第三世界农村饮水安全的角度提出了肯尼亚提高雨水利用效率的实践措施。进入2000年以后,雨水资源化潜力的研究逐步由定性分析转变为定量研究。李红军等^[10]在阐述雨水资源概念和内涵的基础上,从理论潜力、现实潜力和目标潜力3个角度给出了流域雨水资源化潜力的计算公式,建立了目标潜力计算模

收稿日期:2020-02-12;网络首发时间:2020-05-18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20200515.1612.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51709044); 国家杰出青年科学基金项目(51825901); 东北农业大学“青年才俊”基金项目(18QC28); 中国博士后科学基金项目(2019M651247)

作者简介: 孟凡香(1984-), 高级工程师, 主要从事水资源时空变化规律等研究。E-mail: mengfanxiang100@163.com

通讯作者: 付强(1973-), 教授, 主要从事农业水土资源高效利用等研究。E-mail: fuqiang0629@126.com

型；赵西宁等^[11-12]、张宝庆等^[13-14]分别从不同的角度，研究了黄土高原的雨水资源化潜力，并从理论角度提出了雨水资源化潜力的计算和评价模型；BR Sharma等^[15]采用印度604个地区225个主要降雨区在作物生育期的气候水量平衡关系得出了研究区雨水资源潜力约为 $1140\times10^8\text{ m}^3$ ；Md.Tariqul Islam等^[16]构建了孟加拉国山区流域雨水资源化潜力模型理论框架，基于流域面积、灌溉需求、蒸发损失等因子计算了研究区的雨水资源化潜力。上述研究表明，雨水资源化潜力研究无论在理论上还是实践中均取得了一定的研究成果，但从整体上来看，由于区域地质条件、气候条件等方面的差异，导致现有雨水资源化潜力计算模型和理论的适用性不强。因此，基于区域特点，建立适当的雨水资源化潜力计算方法和模型对于提高区域水资源利用效率具有重要的理论和实践意义。

黑龙江省松嫩平原是我国重要的商品粮生产基地，其黑土面积占我国黑土面积的54.2%，对于保障我国粮食安全具有重要的战略地位，水资源相对紧缺问题是制约其农业可持续发展的重要“瓶颈”，如何准确估算松嫩平原雨水资源的潜力，提高雨水资源的利用效率，对于缓解农业水资源紧缺的局面具有重要的实践价值。因此，本文引入分布式水文模型SWAT^[17]，考虑地下水补给量和基流量对雨水资源化潜力的影响，提出研究区雨水资源化潜力理论计算方法，构建适用于黑龙江省松嫩平原地区的雨水资源化潜力模型，评估黑龙江省松嫩平原雨水资源化潜力，以期缓解研究区农业水资源紧张的局面、提高水资源利用效率提供理论和实践保障。

2 研究区域概况

松嫩平原是我国东北三大平原中面积最大的平原，位于大小兴安岭、长白山脉及松辽分水岭之间，主要由松花江和嫩江冲积而成，跨越内蒙古自治区、黑龙江省和吉林省三个行政区^[18]。本文以黑龙江省境内的松嫩平原为研究区，研究区位于黑龙江省西部，地理坐标为 122.41°E — 128.53°E ， 44.07°N — 50.51°N ，东与小兴安岭和张广才岭相邻，南至哈尔滨市五常市，西以黑龙江省与内蒙古自治区省界为分界线，北起黑河市嫩江县，总面积 15.95万 km^2 ，具体位置如图1所示^[19]。

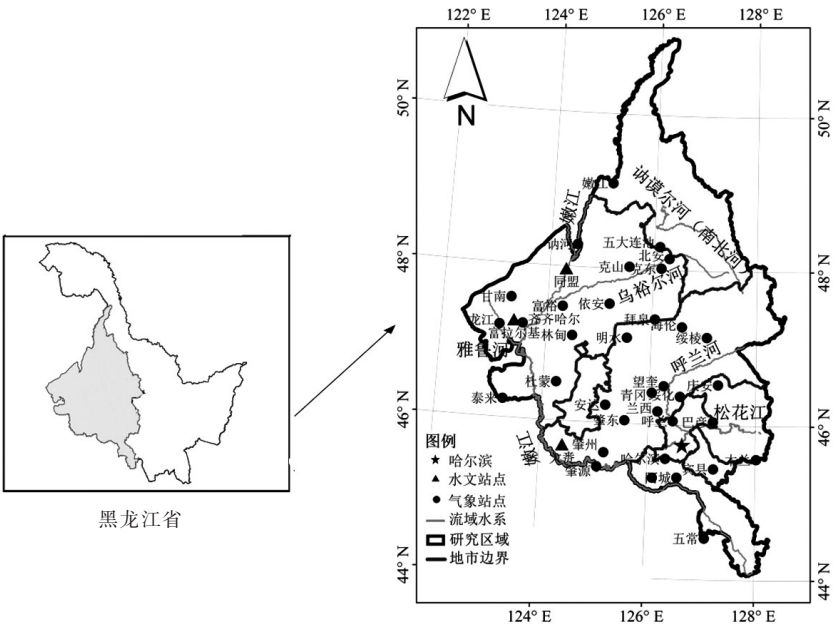


图1 黑龙江省松嫩平原地理位置和水文站点分布

黑龙江省松嫩平原属于松花江水系，松花江是黑龙江右岸的最大支流，总长2309 km，流域面积 54.56万 km^2 ，多年平均径流量733亿 m^3 。全年温差较大，冬季最低气温可达 -30°C 以下，夏季最高气温可达 35°C 以上，多年平均气温 2°C ~ 6°C ，无霜期100~160 d之间，多年平均水面蒸发量600~950 mm，多年平均降水量380~520 mm之间，主要集中在7—9月份。2017年，农作物播种面积达 783.75万 hm^2 ，

占全省的 55.46%；粮食总产量 4039.51 万 t，占全省的 53.67%，由于受到半干旱季风气候和温带大陆性季风气候的影响，降水量相对较少，尤其是西部半干旱区，近几年年降水量不足 300 mm^[20]。为了应对干旱，黑龙江省松嫩平原部分地区地下水超采导致局部地区地下水位下降，这在一定程度上影响了区域生态安全和水安全。

3 雨水资源化潜力计算方法

3.1 雨水资源化潜力的内涵 雨水资源化是指人们通过调控降水在下垫面的时空分布，使之能够被开发利用，进而产生价值的过程，即雨水转化为可利用资源的过程^[5,21]。从雨水的自然属性和社会属性来看，雨水资源化存在两种途径：(1)雨水作为一种自然产物，在自然状态下通过入渗、产流、汇流等形式供给作物生长，即自然资源化过程；(2)雨水作为一种社会产物，通过人类活动干扰，使其转化为资源供农业生产或人畜等利用，即人为资源化过程。雨水资源化潜力不仅包括自然资源化过程的潜力，也包括人为资源化过程的潜力。因此本文在前人研究的基础^[2,14,22-24]上认为：雨水资源化潜力是在当前社会发展和科学技术条件下，以水生态文明建设为前提和保障，通过自然资源化过程和人为资源化过程，将雨水转化为雨水资源的最大能力。

3.2 雨水资源化潜力计算方法 根据上述内涵，雨水资源化潜力是指通过各种方式和技术，雨水可能被开发的理论最大值。对于一个封闭的区域或流域而言，降水是其陆地各种形态水资源的补给来源，若以年为计算单位，则年内降水总量可视为区域或流域内水资源的可更新量，当区域或流域无外来水源时，雨水资源总潜力则为该流域或区域的年降水总量，计算公式如下：

$$R_t = \sum_{i=1}^n P_i \times A_i \times 10^3 \quad (1)$$

式中： R_t 为区域或流域第 t 年的雨水资源总潜力， m^3 ； P_i 为区域或流域第 i 个分区的年平均降水量，mm； A_i 为区域或流域第 i 个分区的控制面积， km^2 ； n 为区域或流域分区个数。

由式(1)可知，雨水资源总潜力与区域或流域的年降水量有关。由于不同气象站点不同年份的降水量存在较大的差异，故其总潜力也会随之变化，一般采用不同降水频率条件下的降水总量作为区域或流域的雨水资源总潜力^[25]。但式(1)仅从降水总量的角度计算了雨水资源的潜力，并未考虑降水的再分配过程。因此，从水循环的角度考虑，雨水降到地面以后主要转化为以下几部分：植被截流量、地表径流量、株间蒸发量、植株蒸腾量、土壤含水量、壤中流、地下水补给量和基流量，则某区域或流域第 i 个分区的年降水量可表示为：

$$P_i = \Delta R_{\text{截}i} + \Delta R_i + \Delta E_{si} + \Delta E_{vi} + \Delta R_{\text{壤}i} + \Delta S_i + \Delta G_i + \Delta BF_i \quad (2)$$

式中： $\Delta R_{\text{截}i}$ 为植被截流量，mm； ΔR_i 为地表径流量，mm； ΔE_{si} 为株间蒸发量，mm； ΔE_{vi} 为植株蒸腾量，mm； $\Delta R_{\text{壤}i}$ 为壤中流量，mm； ΔS_i 为土壤含水量(土壤有效水净增加量)，mm； ΔG_i 为地下水补给量，mm； ΔBF_i 为基流量，mm。则第 t 年雨水资源潜力计算公式可转化为：

$$R_t = \sum_{i=1}^n (\Delta R_{\text{截}i} + \Delta R_i + \Delta E_{si} + \Delta E_{vi} + \Delta R_{\text{壤}i} + \Delta S_i + \Delta G_i + \Delta BF_i) \times A_i \times 10^3 \quad (3)$$

式(3)中的植被截流量 $\Delta R_{\text{截}i}$ 、株间蒸发量 ΔE_{si} 、植株蒸腾量 ΔE_{vi} 等无效损失是不可避免的，人类也不可能完全利用。另外，株间蒸发量 ΔE_{si} 、植株蒸腾量 ΔE_{vi} 实际并非无效损失，而是已经被作物有效利用。因此，对于某一区域或流域第 t 年的可利用雨水资源化潜力的计算公式如下：

$$PAR_t = R_t - \Delta P_1 - \Delta P_2 \quad (4)$$

式中： PAR_t 为可利用雨水资源化潜力， m^3 ； ΔP_1 为已利用水量， m^3 ； ΔP_2 为不可利用的水量， m^3 。其中：

$$\Delta P_1 = \sum_{i=1}^n (\Delta E_{si} + \Delta E_{vi}) \times A_i \times 10^3 \quad (5)$$

对于黑龙江省松嫩平原而言,黑土和黑钙土的面积达到了60%以上,主要分布在东部地区,而风沙土主要分布在西部半干旱区,面积相对较少,故其产流方式多以饱和产流和蓄满产流为主,这个特点决定了 $\Delta R_{壤i}$ 难以被人类利用。因此式(4)中 ΔP_2 可表示为:

$$\Delta P_2 = \sum_{i=1}^n (\Delta R_{截i} + \Delta R_{壤i}) \times A_i \times 10^3 \quad (6)$$

黑龙江省松嫩平原地下水埋深空间差异较大,如:绥化等部分地区最大埋深达到了45 m左右(局部漏斗),而山前倾斜平原枯水期的地下水埋深仅为3.0~5.0 m。已有研究表明:黑龙江省松嫩平原大气降水补给地下水的量占总补给量的70%左右^[26],故在可利用雨水资源潜力中应该考虑地下水补给量 ΔG_i 和基流量 ΔBF_i ,这与已有关于黄土高原的研究有所不同^[25]。根据上述分析,将式(3)、式(5)和式(6)带入式(4),可转化为:

$$PAR_i = \sum_{i=1}^n (\Delta R_i + \Delta S_i + \Delta G_i + \Delta BF_i) \times A_i \times 10^3 \quad (7)$$

式(7)中的参数通过构建SWAT模型进行计算,其中:

$$\Delta S_i = \begin{cases} S_{end} - S_{beg} & \Delta S_i \geq 0 \\ 0 & \Delta S_i \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_{beg} 为降雨初期土壤的有效水含量,mm; S_{end} 为降雨末期土壤的有效水含量,mm。

3.3 SWAT模型 SWAT(Soil and Water Assessment Tool)模型是一种基于GIS基础的分布式水文模型,用于流域水循环、泥沙和非点源污染等模拟,具有较强的物理机制。模型的优势在于输入参数简单、所需驱动数据容易获取且计算效率高,适用于模拟大尺度长期的水文循环和物质运移^[27]。SWAT模型主要包括4大子模块,分别为水文模块、土壤侵蚀与泥沙输运模块、营养物质输运模块和植物生长与经营模块,本文主要运用SWAT模型的水文模块进行模拟。

SWAT模型构建之后需进一步对其进行率定及验证。SWAT-CUP 2012可以进行模型参数的灵敏度分析、率定和验证。模型率定前采用SWAT-CUP软件对径流模拟影响较大的参数进行敏感性分析。SWAT模型包含大量的水文参数,并非所有参数都对模型结果有显著影响,因此需选择对研究区影响较大的参数进行率定验证,来提高模型计算的准确性。本文选择纳什系数(Nash-Sutcliffe Efficiency, NSE)、确定系数(r^2)和百分比偏差($PBIAS$, %)3个指标来评价研究区SWAT模型模拟的适应性,其计算公式如下:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q}_i)(Q_i - \bar{Q}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q}_i)^2 \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q}_i)^2} \quad (10)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - \bar{Q}_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (11)$$

式中: $\hat{Q}$ 为模拟流量, m^3/s ; Q 为实测流量, m^3/s ; $\bar{Q}$ 为实测流量平均值, m^3/s 。当3个指标结果均满足给定标准 $NSE > 0.5$, $r^2 > 0.7$, $|PBIAS| < 25\%$ 时,则表明模型精度符合要求,能够用于研究流域降水汇流过程模拟和相关影响分析^[28]。

3.4 数据来源 SWAT模型需要地形、土地利用、土壤和水文气象等基础数据。考虑到数据的完整性、可获取性和一致性,气象数据采用研究区35个气象站点2008—2016年逐日的最高气温、最低气

表1 数据来源情况

数据	应用	数据描述	数据来源
DEM	子流域划分	30m 分辨率	中科院地理空间数据云 (http://www.gscloud.cn/)
土地利用	HRU 划分	1:1000/2010 年	国家科技资源共享服务平台 (http://www.geodata.cn/)
土壤	HRU 划分	1:1000	世界土壤数据库 HWSO (http://www.fao.org/data/en/)
气象	气象库	最高气温、最低气温、日照时数、平均风速、平均相对湿度、降水	中国国家气象数据网 (http://data.cma.cn/)
月径流	率定验证	同盟、富拉尔基、大赉水文站(2008—2016 年)	黑龙江省水文局

温、日照时数、平均风速、平均相对湿度和降水数据，并对气象站点数据序列进行质量分析，对于部分站点缺失的数据，采用相邻站点的数据，通过相关系数法进行插补。径流数据采用 2008—2016 年研究区内同盟、富拉尔基和大赉 3 个水文站的月径流数据。其它数据具体情况如表 1 所示，气象水文站点分布如图 1 所示。

4 基于 SWAT 的雨水资源化潜力计算模型

4.1 SWAT 模型数据库建立 通过 ArcGIS 对下载的 DEM 进行拼接、裁剪，形成研究区地形数据。通过对研究区土地利用类型进行重分类，共分为 6 类，土地利用类型分布如图 2 所示。将土壤数据进行重分类，在研究区内提取 34 种土壤类型，空间分布如图 3 所示。

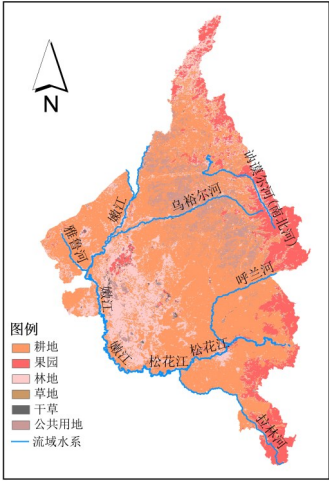


图2 研究区土地利用空间分布

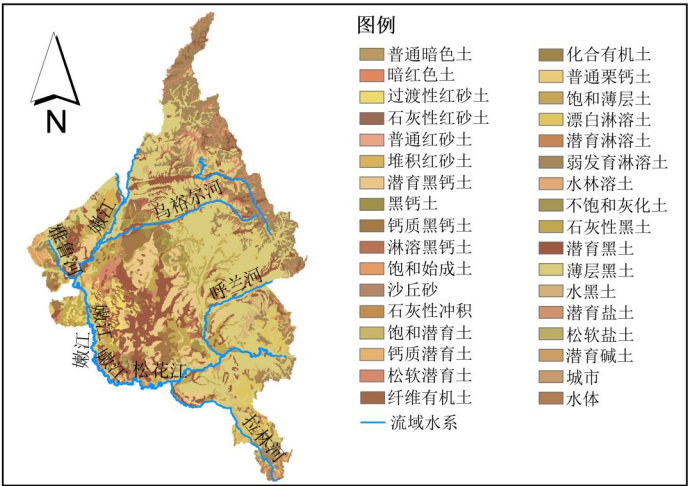


图3 研究区土壤类型空间分布

4.2 子流域与研究分区的划分 子流域是 SWAT 模型划分水文响应单元(HRU)的基础，也是降雨径流过程模拟中进行流域汇流最重要的部分^[29]。根据 DEM 数据对河网进行划分，当汇水面积设置的越小，生成的子流域个数就越多，水系模拟也会越准确。但模型的计算效率会随着子流域的增加、数据量的提高而降低，子流域数量的增加，会使模型模拟的准确度呈现先上升后减小的趋势，随后趋于稳定。本文根据天然河网和盆地地形，将研究区划分为 24 个子流域，如图 4 所示。

划分后的子流域由于流域地质地形条件，土地利用情况，土壤状况等方面的影响，同一个子流域内可能存在不同的水文响应结果。为了反映这些方面带来的多元影响，需要进一步细化划分后的子流域，即 HRU 的划分。根据研究区模型的构建，将子流域划分成为 177 个 HRU，同时，为了便于

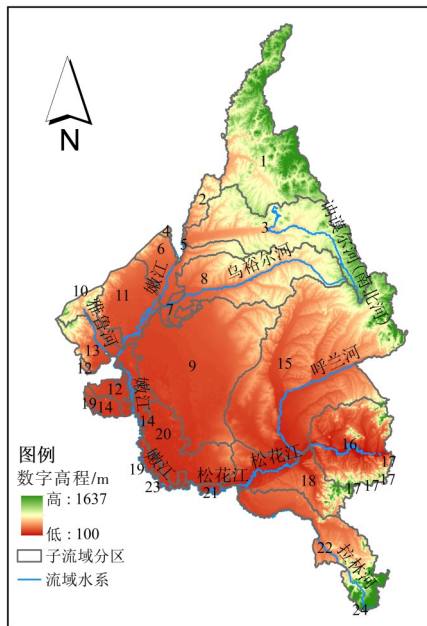


图4 研究区子流域划分

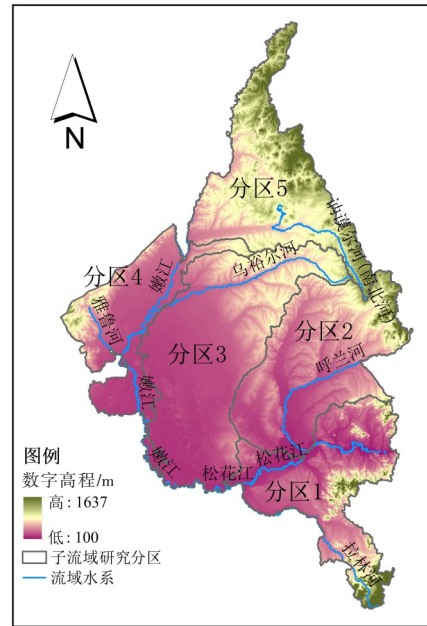


图5 研究区子流域分区

数据统计分析和处理，SWAT模型运行结束后，计算雨水资源化潜力时的子流域分区按照子流域特性进行合并，合并后的分区如图5所示。

4.3 SWAT模型参数率定结果 模型采用大赉、同盟和富拉尔基3个水文站月径流量数据对SWAT模型进行校准。2008年作为模型的预热期，2009—2016年作为率定期。首先利用SWAT-CUP模型内部敏感性分析LH-OAT方法，基于水文站实测数据计算所选12个参数的敏感性，12个参数分别为CN2、ALPHA_BF、GW_DELAY、ESCO、SOL_AWC、SOL_K、CH_K2、GWQMN、GW_REVAP、REVAPMN、SFTMP、SMTMP。通过SWAT-CUP模型中SUFI-2算法进行每次为1000次的迭代，确定参数的最优值(如表2所示)，进而对SWAT模型进行校准。

表2 SWAT模型所选参数及最优值

编号	参数名称	单位	定义	数值
1	CN2		SCS径流曲线数	19.32
2	ALPHA_BF	day	基流alpha因子	0.16
3	GW_DELAY	day	地下水延迟时间	144.04
4	ESCO		土壤蒸发补偿系数	1.37
5	SOL_AWC	mmH ₂ O/mm soil	土壤层的可用水容量	0.28
6	SOL_K	mm/h	土壤水力传导率	144.60
7	CH_K2	mm/h	主河道河床曼宁系数	233.91
8	GWQMN	mmH ₂ O	发生回归流所需的浅层含水层的水位阈值	333.75
9	GW_REVAP		地下水的revap系数	0.15
10	REVAPMN	mm	浅层地下水再蒸发系数	2.55
11	SFTMP	℃	降雪气温	-3.18
12	SMTMP	℃	融雪基温	1.84

模型校准中大赉站、同盟站和富拉尔基站的 NSE 、 r^2 、 $PBIAS$ 分别为0.78、0.83和14%；0.68、0.79和21%；0.74、0.84和14%，均满足给定精度，表明所构建的SWAT模型适用于此区域的研究。图6显示了研究区水文站的实测流量与模拟流量之间的对比结果，实测值和模拟值出现的峰值时间一致，衰退时期也一致，其中：大赉站2011年模拟效果最好，同盟站和富拉尔基站2013年模拟效果最好，虽然模拟值和实测值之间还存在一定差异，但总体而言，SWAT模型在此研究区域的

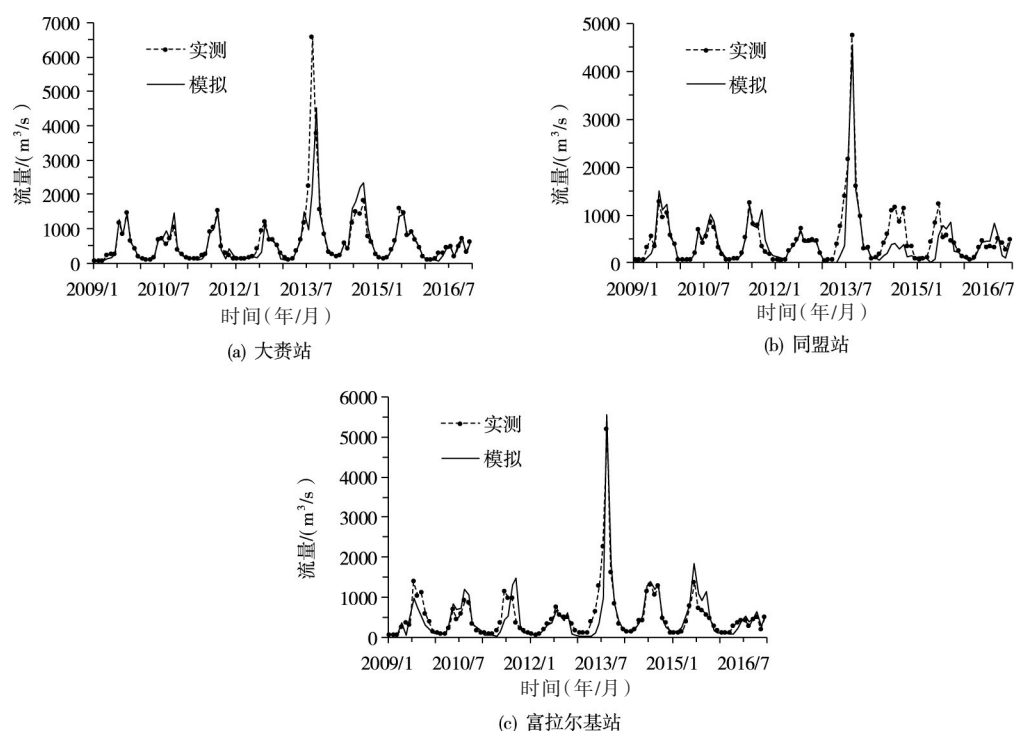


图6 模型校准过程中实测和模拟的月径流量

模拟效果较好。

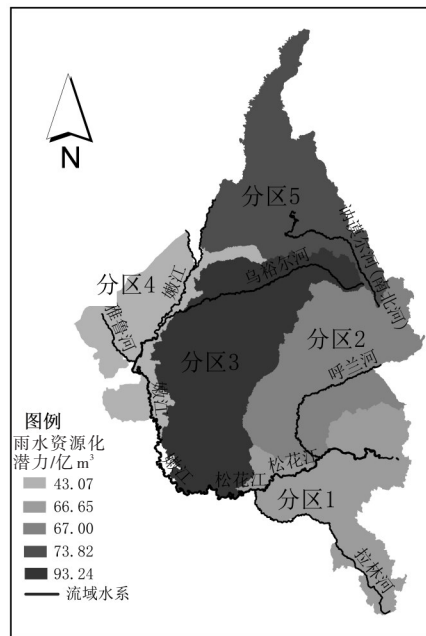
5 区域雨水资源化潜力计算及时空分布

由于黑龙江省松嫩平原冬季寒冷，基本无作物种植，因此本文仅计算作物生育期5—9月的雨水资源化潜力。将研究区35个气象站2008—2016年的逐日降水数据输入率定后SWAT模型中，计算研究区的雨水资源化潜力。

5.1 生育期雨水资源化潜力计算精度分析 黑龙江省松嫩平原2008—2016年各分区生育期多年平均雨水资源化潜力计算结果见表3。由表3可知：未考虑地下水补给量 ΔG_i 和基流量 ΔBF_i 时，黑龙江省松嫩平原生育期多年平均水层深度为149.18 mm，平均可利用雨水资源化潜力为235.95亿 m^3 ，与生育期多年平均雨水总量683.71亿 m^3 相比，其百分比为34.51%；考虑地下水补给量 ΔG_i 和基流量 ΔBF_i 时，生育期多年平均水层深度为215.80mm，平均可利用雨水资源化潜力为343.78亿 m^3 ，占多年平均雨水总量的50.28%。考虑地下水补给量 ΔG_i 和基流量 ΔBF_i 计算得到的生育期多年平均可利用雨水资源化潜力比未考虑时增加了45.70%，大大提高了雨水资源化潜力的计算精度，为缺水的黑龙江省

表3 黑龙江省松嫩平原2008—2016年各分区多年平均生育期雨水资源化潜力

分区	面积 /万 km^2	地下水补给 量/mm	产流 量/mm	基流量/ mm	土壤水增 量/mm	未考虑 ΔG_i 、 ΔBF_i 雨水资源化 潜力/mm	未考虑 ΔG_i 、 ΔBF_i 雨水资源化 潜力/亿 m^3	考虑 ΔG_i 、 ΔBF_i 雨水资源化 潜力/mm	考虑 ΔG_i 、 ΔBF_i 雨水资源化 潜力/亿 m^3
1	2.85	91.25	92.68	4.86	45.08	137.76	39.26	233.86	66.65
2	3.38	12.88	161.96	2.38	20.99	182.95	61.84	198.22	67.00
3	4.45	83.32	101.97	4.21	20.03	122.00	54.29	209.53	93.24
4	2.17	41.69	101.97	14.12	40.71	142.68	30.96	198.49	43.07
5	3.09	59.60	124.72	18.79	35.79	160.51	49.60	238.89	73.82
合计	15.95	57.75	116.66	8.87	32.52	149.18	235.95	215.80	343.78



松嫩平原地区提供了更科学的雨水资源化潜力计算方式,可以用来指导研究区更好地进行集雨管理工作。

5.2 各分区生育期雨水资源化潜力空间分布规律 根据表3绘制各分区生育期雨水资源化潜力空间分布(图7)。由图7分析可知:黑龙江省松嫩平原生育期多年平均可利用雨水资源化潜力为343.78亿 m^3 ,其中:地下水补给量占比26.76%、地表径流量占比为54.06%,基流量占比为4.11%,土壤水增量占比为15.07%;雨水资源化潜力最大的为分区3,达到了93.24亿 m^3 ,占研究区总量的27.12%;雨水资源化潜力最小的为分区4,仅为43.07亿 m^3 ,占研究区总量的12.53%。

从单位面积上的雨水资源化潜力来看, 分区5最大, 为23.89亿 $\text{m}^3/\text{万 km}^2$, 分区2最小, 为19.82亿 $\text{m}^3/\text{万 km}^2$ 。可见, 黑龙江省松嫩平原生育期雨水资源化潜力在空间上具有一定的差异性。

从雨水资源化潜力的构成来看,各分区产流量在雨水资源化潜力中占比均较大,如分区2,其产流量达到了161.96 mm,占分区雨水资源化潜力比例达到了80%以上。根据黑龙江省人民政府公布的水土流失重点防治区可知:位于松嫩平原的哈尔滨市、齐齐哈尔市、大庆市、五常市、五大连池市、北安市、讷河市、克山县、克东县、拜泉县、依安县、绥化市、嫩江县等32个县市为重点治理区,几乎包含了松嫩平原的所有区域。因此,对于黑龙江省松嫩平原而言,可重点开发和应用降水径流汇集、径流蓄存和集雨补灌等相关技术,为农田防护林、防风固沙林以及退耕还林还草工程提供充足的水源,以达到合理利用和调控地表径流、减缓水土流失造成的危害等双重效果。

从各分区的土壤水增量来看, 分区4最大, 超过了45 mm, 是分区2和分区3土壤水增量的2倍以上。因此, 对于分区4(黑龙江省松嫩平原西部半干旱区), 在今后节水灌溉技术研究和实际生产应用过程中, 应加大对土壤扩蓄增容、土壤保水剂和抗旱剂、土壤水与作物水高效转化等方面的技术研发和应用工作, 进而充分利用雨水资源, 保护区域生态安全, 促进区域环境可持续发展。

5.3 各分区生育期雨水资源化潜力时间变化规律

黑龙江省松嫩平原 2008—2016 年各分区生育期历年雨水资源化潜力计算结果如表 4—表 8 所示。

由表4—表8可知：各分区不同年份雨水资源化潜力存在较大的差异。对于分区1，研究时段内雨水资源化潜力的变化区间为[33.92 104.2]亿 m^3 ，其中：2016年最小，不足最大年份2014年的1/2；2008—2011年与2011—2016年两个时段变化规律相似，均呈现出先增大后减小的趋势，但2008—2011年的雨水资源化潜力均值为47.33亿 m^3 ，仅为2011—2016年均值82.11亿 m^3 的57.65%。在构成

表4 黑龙江省松嫩平原2008—2016年分区1生育期雨水资源化潜力

年份	面积/万 km ²	地下水 补给量/mm	产流量/mm	基流量/mm	土壤水 增量/mm	雨水资源 化潜力/mm	雨水资源 化潜力/亿 m ³
2008	2.85	35.84	56.58	0.45	32.74	125.61	35.80
2009		67.45	66.18	5.08	51.77	190.48	54.29
2010		69.09	64.91	0.00	56.00	190.00	54.15
2011		74.46	42.93	0.07	40.76	158.22	45.09
2012		80.41	100.23	4.40	76.14	261.17	74.43
2013		102.15	209.20	9.68	33.96	355.00	101.18
2014		204.15	122.69	13.52	25.26	365.62	104.20
2015		155.62	127.38	9.83	46.81	339.65	96.80
2016		32.05	43.98	0.70	42.28	119.01	33.92
均值		91.25	92.68	4.86	45.08	233.86	66.65
变差系数		0.5781	0.5497	0.9856	0.3161	0.3991	0.3991

表5 黑龙江省松嫩平原2008—2016年分区2生育期雨水资源化潜力

年份	面积/ 万 km ²	地下水 补给量/mm	产流量/mm	基流量/mm	土壤水 增量/mm	雨水资源 化潜力/mm	雨水资源 化潜力/亿 m ³
2008	3.38	0.00	144.38	0.00	4.58	148.96	50.35
2009		0.00	132.72	0.00	35.47	168.19	56.85
2010		0.00	182.20	0.00	8.80	191.00	64.56
2011		95.18	147.78	21.44	0.00	264.40	89.37
2012		0.00	174.33	0.00	42.32	216.64	73.22
2013		20.73	314.10	0.00	24.68	359.50	121.51
2014		0.01	134.07	0.00	8.92	143.00	48.33
2015		0.00	133.94	0.00	33.80	167.74	56.70
2016		0.00	94.13	0.00	30.38	124.52	42.09
均值		12.88	161.96	2.38	20.99	198.22	67.00
变差系数		2.3142	0.3638	2.8311	0.6985	0.3508	0.3508

表6 黑龙江省松嫩平原2008—2016年分区3生育期雨水资源化潜力

年份	面积/ 万 km ²	地下水 补给量/mm	产流量/mm	基流量/mm	土壤水 增量/mm	雨水资源 化潜力/mm	雨水资源 化潜力/亿 m ³
2008	4.45	89.70	32.47	3.18	19.35	144.70	64.39
2009		66.50	77.13	1.03	34.74	179.40	79.83
2010		49.10	70.95	1.81	6.54	128.40	57.14
2011		74.88	53.03	1.88	23.81	153.60	68.35
2012		93.85	91.84	1.17	33.71	220.56	98.15
2013		58.95	179.76	13.56	11.58	263.84	117.41
2014		59.86	204.40	11.32	12.15	287.73	128.04
2015		129.79	90.79	3.79	13.14	237.51	105.69
2016		127.28	117.35	0.15	25.24	270.02	120.16
均值		83.32	101.97	4.21	20.03	209.53	93.24
变差系数		0.3326	0.5252	1.0805	0.4732	0.2683	0.2683

表7 黑龙江省松嫩平原2008—2016年分区4生育期雨水资源化潜力

年份	面积/ 万 km ²	地下水补给量 /mm	产流量/mm	基流量/mm	土壤水 增量/mm	雨水资源 化潜力/mm	雨水资源 化潜力/亿 m ³
2008	2.17	9.63	64.53	7.37	51.71	133.24	28.91
2009		64.48	107.30	16.17	58.27	246.22	53.43
2010		10.70	107.88	8.71	17.66	144.95	31.45
2011		50.09	51.95	4.68	50.68	157.41	34.16
2012		19.60	155.74	11.00	65.03	251.38	54.55
2013		40.70	109.41	25.24	22.53	197.88	42.94
2014		30.20	167.33	30.46	32.48	260.47	56.52
2015		69.86	72.90	7.80	24.21	174.77	37.93
2016		79.98	80.65	15.68	43.78	220.09	47.76
均值		41.69	101.97	14.12	40.71	198.49	43.07
变差系数		0.5907	0.3653	0.5835	0.3954	0.2300	0.2300

表8 黑龙江省松嫩平原2008—2016年分区5生育期雨水资源化潜力

年份	面积 /万 km ²	地下水 补给量/mm	产流量/mm	基流量/mm	土壤水 增量/mm	雨水资源 化潜力/mm	雨水资源 化潜力/亿 m ³
2008	3.09	4.09	48.54	0.00	50.78	103.41	31.95
2009		52.55	135.94	16.38	48.26	253.14	78.22
2010		32.79	148.75	29.88	34.62	246.04	76.03
2011		53.97	56.56	0.62	47.17	158.32	48.92
2012		55.65	141.76	9.61	36.93	243.96	75.38
2013		51.25	165.82	56.75	19.54	293.36	90.65
2014		106.23	161.89	11.26	34.52	313.90	97.00
2015		106.85	151.08	39.21	21.04	318.18	98.32
2016		73.02	112.12	5.36	29.22	219.72	67.89
均值		59.60	124.72	18.79	35.79	238.89	73.82
变差系数		0.5173	0.3313	0.9702	0.3002	0.2804	0.2804

上,地下水补给量和产流量占比均较大,其均值分别达到了雨水资源化潜力的39.03%和39.63%,在时间上均呈现出先增加后减小的趋势,但其最大值出现的时间点具有一定的差异,地下水补给量为2014年,而产流量则为2013年。

分区2的雨水资源化潜力变化规律与分区1在时间上存在较大的差异,整个研究时段内基本呈现出先增大后减小的趋势,其变化区间为[42.09 121.51]亿 m³,但其最小值出现的年份与分区1相同。在构成上,产流量占比最大,其均值超过了雨水资源化潜力的80%,研究时间段内与雨水资源化潜力呈现出相似的变化规律;而地下水补给量和基流量,仅在部分年份有值,其余几乎为0。这与分区2的地下水位埋深较大有关,已有研究表明^[26],分区2的绥化市等地区地下水埋深超过了40 m,雨水对其补给的潜力已经很小了。

分区3的雨水资源化潜力变化规律与分区1和分区2在时间上均不相同,整个研究时段内基本呈现出逐渐增加的趋势,平均每年增加约8.19亿 m³,其变化区间为[57.14 128.04]亿 m³,但其最大值出现的年份与分区1相同。在构成上,产流量占比最大,其均值达到了雨水资源化潜力的48.67%,研究时间段内与雨水资源化潜力呈现出相似的变化规律。

分区4的雨水资源化潜力在整个研究时段内无明显的上升或下降趋势,随着时间推移呈现出波动特征,其变化区间为[28.91 56.52]亿 m³,较前三个分区变幅明显下降,可见分区4在整个研究时段内雨水资源化潜力分布比较均匀。在构成上,与前三个分区相同,产流量占比最

大,其均值超过了雨水资源化潜力的50%,研究时间段内与雨水资源化潜力呈现出相似的变化规律。

分区5的雨水资源化潜力在整个研究时段内与分区1相同,2008—2011年与2011—2016年两个时段均呈现出先增大后减小的趋势,其变化区间为 $[31.95\ 98.32]$ 亿 m^3 。在构成上,与前四个分区相同,产流量占比最大,其均值超过了雨水资源化潜力的50%,研究时间段内与雨水资源化潜力呈现出相似的变化规律。

由于变差系数反映了雨水资源化潜力年际变化特征,其值大小在一定程度上体现了可开发利用的难度。从5个分区研究时段雨水资源化潜力的变差系数可以看出,分区1和分区2相对较大,均超过了0.35,分区3—分区5的相对较少,均小于0.30,即:分区1和分区2的雨水资源化潜力年际波动较大,不便于开发利用;而相对于分区1和分区2,分区3—分区5的雨水资源化潜力年际波动则较小,更利于开发利用。

6 结论

松嫩平原水资源紧缺问题已经严重阻碍了区域农业可持续发展,本文结合区域特点,考虑地下水补给量和基流量对雨水资源化潜力的影响,提出了黑龙江省松嫩平原雨水资源化潜力计算方法,借助SWAT模型,计算了研究区2008—2016年生育期的雨水资源化潜力及其各组成,并对其空间分布特征和时间变化规律进行了分析,主要得到以下结论:

(1)考虑地下水补给量和基流量的影响,雨水资源化潜力计算精度更高,比未考虑时多年平均生育期雨水资源化潜力增加了45.70%。空间分布上,研究区生育期雨水资源化潜力具有一定的差异性,分区5潜力最大,分区2最小,因此要根据不同分区的特点,充分提高雨水收集利用效率,保证区域生态的可持续发展。从构成来看,各分区产流量在雨水资源化潜力中占比均最大,建议重点开发和应用降水径流汇集、径流蓄存和集雨补灌等相关技术。分区4土壤水增量最大,在实际生产应用过程中,建议应加大土壤水与作物水高效转化等方面的技术研发和应用工作。

(2)2008—2016年研究区生育期多年平均可利用雨水资源化潜力为343.78亿 m^3 ,各分区年际间雨水资源化潜力及其构成均存在较大的差异,其中潜力最大的为分区3,最小的为分区4,其雨水资源化潜力分别占研究区总量的27.12%和12.53%。同一分区年际间雨水资源化潜力呈波动趋势,这主要是由于研究区不同年份降雨量存在较大差异导致的。各分区中,年际间基流量和地下水补给量的波动性均较大,进一步验证了研究区雨水资源化潜力计算要充分考虑基流量和地下水补给量带来的影响。

(3)本研究采用水文模型计算雨水资源化潜力,可以提高雨水资源化潜力计算的精度,能够为研究区提高雨水资源利用率,指导农业生产实践提供科学参考。但由于影响雨水资源化的因素还有很多,而且水文模型本身也存在一定的不确定性,因此导致雨水资源化潜力计算结果亦存在不确定性,此问题需要在下一步工作中进一步完善。

参 考 文 献:

- [1] ZHAN C S, JIANG S S, SUN F B, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Wei River basin, China[J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3069–3077.
- [2] 吴普特,赵西宁,张宝庆,等.黄土高原雨水资源化潜力及其对生态恢复的支撑作用[J].水力发电学报, 2017, 36(8): 3–13.
- [3] KIELY G. Climate change in ireland from precipitation and streamflow observations[J]. Advances in Water Resources, 1999, 23(2): 141–151.

- [4] HANDLA L, TEMBO J M, MWIINDWA C . Potential of rainwater harvesting in urban Zambia[J] . Physics and Chemistry of the Earth, 2003, 28(20-27): 893-896 .
- [5] 冯浩, 邵明安, 吴普特 . 黄土高原小流域雨水资源化潜力计算与评价初探[J] . 自然资源学报, 2001, 16(2): 140-144 .
- [6] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等 . 小流域雨水资源化潜力及其可持续利用分析[J] . 农业工程学报, 2005, 21(7): 45-48 .
- [7] 李武彦, 程万一, 韩孟书, 等 . 豫西旱作农业区提高天然降水利用率增产技术研究[J] . 中国水土保持, 1995, 14(4): 33-36, 62 .
- [8] 郑宝宿 . 甘肃省雨水资源化利用与旱地农业发展[J] . 中国水土保持, 1997(9): 1-4 .
- [9] KAREN Iles . Harvesting rainwater using a simple catchment surface[J] . Waterlines, 1989, 7(4): 23-25 .
- [10] 李红军, 曹建生, 张万军 . 流域雨水资源化目标潜力计算模型研究[J] . 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 159-63 .
- [11] 赵西宁, 冯浩, 吴普特, 等 . 黄土高原小流域雨水资源化综合效益评价体系研究[J] . 自然资源学报, 2005, 20(3): 354-360 .
- [12] 赵西宁, 吴普特, 冯浩, 等 . 基于 GIS 的区域雨水资源化潜力评价模型研究[J] . 农业工程学报, 2007, 23(2): 6-10 .
- [13] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁, 等 . 黄土高原雨水资源化潜力与时空分布特征[J] . 排灌机械工程学报, 2013, 31(7): 89-97 .
- [14] ZHANG Baoqing, WU Pute, ZHAO Xining, et al . Assessing the spatial and temporal variation of the rainwater harvesting potential (1971-2010) on the Chinese Loess Plateau using the VIC model[J] . Hydrological Processes, 2014, 28(3): 534-544 .
- [15] SHARMA B R, RAO K, VITTAL K, et al . Estimating the potential of rainfed agriculture in India: Prospects for water productivity improvements[J] . Agricultural Water Management, 2010, 97(1): 23-30 .
- [16] ISLAM M T, ULLAH M M, AMIN M G M, et al . Rainwater harvesting potential for farming system development in a hilly watershed of Bangladesh[J] . Applied Water Science, 2017, 7(5): 2523-2532 .
- [17] 杨国胜, 黄介生, 李建, 等 . 基于 SWAT 模型的绿水管理生态补偿标准研究[J] . 水利学报, 2016, 47(6): 809-815 .
- [18] ZHANG Yuan, ZANG Shuying, SUN Li, et al . Characterizing the changing environment of cropland in the Songnen Plain, Northeast China, from 1990 to 2015[J] . Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(5): 658-674 .
- [19] 张继心 . 黑龙江省松嫩平原县域农村土地整治成效评价研究[D] . 哈尔滨: 东北农业大学, 2016 .
- [20] 李天霄, 付强, 孟凡香, 等 . 黑龙江省降水变化趋势及其对农业生产的影响研究[J] . 灌溉排水学报, 2017, 36(5): 103-108 .
- [21] 徐学选, 穆兴民, 王文龙 . 黄土高原(陕西部分)雨水资源化潜力初步分析[J] . 资源科学, 2000, 22(1): 33-36 .
- [22] 郭龙 . 甘肃西峰区雨水资源化及利用潜力评价分析[J] . 地下水, 2017, 39(4): 117-118 .
- [23] 马永强, 李梦华, 郝姗姗, 等 . 黄土丘陵沟壑区雨水资源化途径及潜力分析[J] . 中国农村水利水电, 2018(7): 9-14 .
- [24] ZHAO Xining, WU Pute, FENG Hao, et al . Towards development of eco-agriculture of rainwater-harvesting for supplemental irrigation in the semi-arid Loess Plateau of China[J] . Journal of Agronomy & Crop Science, 2010, 195(6): 399-407 .
- [25] 张宝庆 . 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究[D] . 杨凌: 西北农林科技大学, 2014 .
- [26] 丛璐 . 松嫩平原(黑龙江)地下水动态特征及超采区评价研究[D] . 长春: 吉林大学, 2017 .
- [27] WANG R Y, YUAN Y P, YEN H, et al . A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns [J] . Science of the Total Environment, 2019, 669: 512-526 .
- [28] MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al . Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J] . Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900 .
- [29] LIU Y Z, GUO T, WANG R Y, et al . A SWAT-based optimization tool for obtaining cost-effective strategies for agricultural conservation practice implementation at watershed scales [J] . Science of the Total Environment, 2019, 691: 685-696 .

Study on the calculation model of regional rainwater resource potential and its temporal and spatial distribution

MENG Fanxiang^{1, 4}, LI Tianxiao^{1, 2, 3}, FU Qiang^{1, 2, 3}, LIU Dong^{1, 2, 3}, YANG Liyan¹

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources of Ministry of Agriculture,
Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

3. Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Water Resources and Water Conservancy Engineering in Cold Region,
Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

4. Heilongjiang Agricultural Reclamation Survey and Design Institute, Harbin 150090, China)

Abstract: In order to make full use of rainwater resources to deal with the problem of water shortage of Songnen Plain in Heilongjiang Province, this study put forward the rainwater resources potential calculation method and formula as well as applied the SWAT model to construct the rainwater resources potential model. The model can evaluate the rainwater utilization potential in Songnen Plain of Heilongjiang Province. The results show that, in terms of time and space, there are some differences in rainwater resources potential in Songnen Plain of Heilongjiang Province. For the different partitions, there are also diversities and for the same partition in different years, there are some distinctions as well. The rainwater resources potential of the average annual available rainwater in the growth period is $34.378 \times 10^9 \text{ m}^3$, accounting for 50.28% of the total annual average rainwater in the growth period. The runoff generation of each partition accounted for a large proportion in the rainwater resources potential. It's suggested that attention should be paid to the related technologies such as precipitation and runoff gathering, runoff storage and rainwater collection and supplementary irrigation. The application of water-saving irrigation technology should be paid attention to in the area where soil water increment accounts for a large proportion in the rainwater resources potential. In general, the Songnen Plain of Heilongjiang Province has great potential for rainwater resources potential, so it's necessary to improve the utilization rate of rainwater resources scientifically and rationally to ensure the sustainable development of agriculture.

Keywords: Songnen Plain; rainwater resources potential; SWAT model; temporal and spatial distribution

(责任编辑: 王学凤)

《水利学报》征订启事

《水利学报》创刊于1956年,是中国水利学会主办的综合性学术刊物,是水利行业创刊最早、国内外最具影响的学术期刊,在水利工程类核心期刊中排第一位,被国内外多家检索系统收录。《水利学报》刊登反映水利、水电、水运领域较高水平的学术论文、专题综述和工程技术总结,开展学术论文的讨论和评论,介绍国内科技动态和消息。主要专业范围包括:水文及水资源、防洪、灌溉及排水、水力学、泥沙、河港及水运、岩土工程、水工结构及材料、水利水电施工及监理、水力机电、水利经济、水环境、水利史研究等。本刊邮局发行,邮发代号2—183。每册30元,全年订价360元。

主编:程晓陶 国内统一刊号:CN11-1882/TV 国外代号:M216

地址:北京海淀区复兴路甲1号院 邮政编码:100038

投稿网址: <http://jhe.ches.org.cn>

联系电话:010-68786919; 010-68786221; 010-68786238; 010-68786262

传真:010-68786649; E-mail: slxb@iwhr.com

《水利学报》编辑部