

# 人工毛竹林生态水文过程对气候变化的响应

陈明向<sup>1,2</sup>, 翟禄新<sup>1,2</sup>, 阳 扬<sup>1,2</sup>, 薛开元<sup>1,2</sup>

(1.广西师范大学 环境与资源学院, 广西 桂林 541004;

2.珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**为揭示生态水文过程与气候变化的关系,以广西猫儿山典型流域人工毛竹林为研究对象,利用 Hydrus-1D 模型模拟了毛竹林土壤水分及其他水文要素,在此基础上,针对设定的不同气候变化情景,分析了人工毛竹林对气候变化的响应。结果表明:Hydrus-1D 模型可满足人工毛竹林生态水文分析,人工毛竹林蒸散发量占总降水量的 28.40%,径流以基流为主。在不同气候变化情景下,气温升幅控制蒸发和蒸腾的增幅,且冬季增幅大于夏季增幅。径流对降水变化更敏感,降水变化会更多地影响夏季径流,而气温则更易影响冬季径流。降水对夏季土壤储水量影响大于冬季,气温则更多地影响冬季土壤储水量。气温降水耦合情况下,土壤储水量对降水减少气温升高时敏感性最明显,总体表现为冬季土壤储水量更易受影响。研究结果可为区域生态规划、水资源开发利用等提供参考依据。

**关键词:**生态水文; 气候变化; Hydrus-1D 模型; 人工毛竹林

中图分类号:S715

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0189-08

## Response of Ecohydrological Processes in Artificial Bamboo Forest to Climate Change

CHEN Mingxiang<sup>1,2</sup>, ZHAI Luxin<sup>1,2</sup>, YANG Yang<sup>1,2</sup>, XUE Kaiyuan<sup>1,2</sup>

(1.School of Environment and Resources, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

2.Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract:** In order to reveal the relationship between ecohydrological processes and climate change, the artificial bamboo forest in typical watershed of Mao'er Mountain, Guangxi Province was used as the research object. The Hydrus-1D model was used to simulate the soil moisture and other hydrological elements of the bamboo forest. Different climate change scenarios were set to analyze the response of the artificial bamboo forest to climate change. The results show that the Hydrus-1D model is suitable for the ecohydrological analysis of the artificial bamboo forest; the evapotranspiration of the artificial bamboo forest accounts for 28.40% of the total precipitation, and the runoff is mainly base flow; under different climate change scenarios, the increase of evaporation and transpiration is controlled by the increase of temperature, and the increase in winter is greater than that in summer; runoff was more sensitive to changes in precipitation; changes in precipitation affect summer runoff more, while temperature is more likely to affect winter runoff; precipitation has more influence on soil water storage in summer than in winter, while temperature has more influence on soil water storage in winter; under the condition of coupling with temperature and precipitation, soil water storage is most sensitive to the decrease of precipitation and the increase of temperature, and the soil water storage overall is more obviously affected in winter. These results can provide reference for regional ecological planning and water resources development and utilization.

**Keywords:** ecohydrology; climate change; Hydrus-1D model; artificial bamboo forest

收稿日期:2021-04-08

修回日期:2021-04-26

资助项目:国家自然科学基金项目“人工毛竹林根冠关系及其水热传输效应研究”(41867028),“漓江流域上游区气候和植被变化的生态水文响应机制研究”(41261005)

第一作者:陈明向(1997—),男,黑龙江林甸人,硕士研究生,研究方向为地表环境过程。E-mail:18877317275@163.com

通信作者:翟禄新(1970—),男,甘肃礼县人,博士,副教授,主要从事气候变化的水文响应、流域生态水文过程和水热平衡方面等方面的研究。E-mail:zhailuxin6931@163.com

水循环不仅影响大气、土壤和植被的结构、功能、分布格局及动态变化,还影响地球能量收支、转换和分配,在维持生物圈和地圈生态平衡过程中起着至关重要的作用<sup>[1]</sup>。随着地球气候系统长时间的剧烈变动,在一定程度上导致水文循环过程发生改变<sup>[2-3]</sup>,进而可能影响区域生态环境的可持续利用。因此,气候变化所引起的水文效应问题成为国际学者普遍关注的焦点<sup>[4-6]</sup>,近年来对该过程的机理认识和模型模拟等方面的研究取得了一定的进展<sup>[7-8]</sup>。

气候变化对水文循环过程的影响研究主要通过以下两种方式实现<sup>[9]</sup>:一是凭借全球气候模型输出结果耦合水文模型,进而评估区域水文循环过程的未来形势,二是将假定的气候情景模式输入水文模型,分析水文要素对气候因子的敏感程度。流域水文模型是评估区域水循环对气候变化响应普遍使用的工具之一<sup>[9-10]</sup>。Hydrus-1D模型由美国盐土实验室研发,将土壤—植物—大气连续体(SPAC)系统中的大气降水、土壤水热运动、植被根系吸水和溶质运移过程相耦合,适用于恒定或非恒定的边界条件的模拟,为特定生态条件下水循环模拟提供了可能。该模型中编辑的灵活性和突出的参数反演求解功能<sup>[11-13]</sup>,使其在农业、环境科学及土壤学等领域得到广泛应用<sup>[14-16]</sup>。

气候变化主要通过影响大气降水和气温,进而影响实际蒸散发、土壤含水量和径流等相关水文要素,最终引起水资源在时空分布上的改变,甚至影响植被分布格局的变化。有研究表明,采用降尺度的方式研究长江源头流域高寒草甸、草原、沼泽生态水文过程及对气候变化响应机制,结果显示降水是蒸散量的主要制约因子,也是影响径流产生的关键因素,而气温则对径流的影响较弱<sup>[17]</sup>。此外,针对黄土高原泾河流域内主要植被天然次生林和华北落叶松人工林的实际情况,采用单一气候变化模式进行模拟,结果表明降水量与流域内年径流、冠层蒸散量、土壤蒸发量和土壤蓄水量表现为正相关关系,其中对径流的影响最显著,温度与流域内年径流和土壤蓄水量也呈现正相关关系,但与年蒸散量是负相关关系<sup>[18]</sup>。基于漳卫南流域实测气象资料,运用水文模型并设置不同气候情景揭示其流域内水文循环过程表明,降水量增加,蒸散量、径流量和产水量均随之增加,流域气温增加,蒸散量也相应增加,但径流量和产水量随气温增加而表现出降低趋势<sup>[19]</sup>。不同气候情景模式下,分析华北平原滦河流域主要土地覆被类型为林地的水文过程,结果表明,在保持降水不变气温增加的前提

下,蒸散发增加幅度较缓,径流减少幅度较大,而在气温不变降水增加的条件下,蒸散发及径流的增加幅度明显<sup>[20]</sup>。基于降水—气温耦合模式下,土地利用类型以耕地、林地、草地为主的北京妫水河流域水循环过程的研究结果表明,在设定降水减少和温度升高的条件下,流域内的径流、实际蒸散量和土壤含水量随之减少,整体呈现干旱化倾向<sup>[21]</sup>。通过探讨长江中下游南岸的鄱阳湖流域内主要土地利用类型耕地、林地、草地对气候变化的响应得出,与气温相比,径流、基流量对降水变化更具敏感性,而土壤蒸发量对温度变动的敏感性更高<sup>[22]</sup>。

总体来看,气候变化对水文循环过程影响的研究已取得了大量的成果,但针对我国广泛分布的人工毛竹林生态水文过程与气候变化的关系缺少定量研究,且现有研究多以植被的大尺度空间分布格局作为响应对象开展,研究并多集中于我国北方或长江流域<sup>[23]</sup>。本研究以地处湿润区的广西壮族自治区东北部猫儿山下典型小流域的人工毛竹林地为研究对象,利用Hydrus-1D模型,在土壤水分模拟的基础上,分析人工毛竹林生态水文过程及其对气候变化的响应,认识流域生态水文特征,定量揭示毛竹林水循环特征及变化趋势,补充珠江流域气候变化研究内容,为区域生态规划与管理、水资源评价和可持续开发利用提供科学依据。

## 1 数据来源及研究方法

研究区域位于广西壮族自治区东北部猫儿山脚下的下高寨村南的毛竹林地,其流域面积 20.5 hm<sup>2</sup>,其地理坐标为 25°50′51.42″—110°28′49.94″,属于中亚热带山地气候,年均气温 12.8℃,年降水量 2 100 mm 以上,土壤为黄红壤,高程 432~496 m,坡度在 15°~30°。流域内以毛竹为主,其间混有少量的杉木。此流域的植被为人工毛竹林,具有较好的人工植被的典型性和代表性,为研究桂北地区流域生态系统和水文过程及其相互影响提供了良好条件。在研究区内供设置 11 个土壤水分观测点(图 1),其中 1, 2, 3, 6, 8, 9 位于坡中或坡脚,观测深度为 170 cm,其余点位于斜坡或近于分水岭,观测深度为 50—70 cm。考虑不同观测点的位置、观测深度必须大于毛竹最大根系分布深度和数据的完整性,本次研究以 1, 3, 9 号 3 个点进行土壤水分模拟和气候变化响应分析。

### 1.1 土壤水分监测

选用土壤水分测量系统(型号为 TRIME-PICO-

IPH,德国制造)监测土壤水分,每个测点垂直相距 10 cm 测定一个土壤水分数据,每间隔 4~6 d 左右测量一次,监测时间为 2015 年 12 月 30 日至 2016 年 12 月 9 日。其中 1,9 号点土壤水分观测深度均为 150 cm,3 号点为 130 cm。

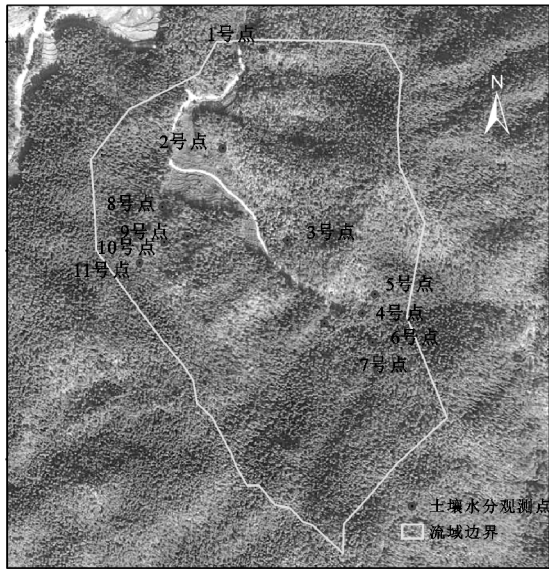


图1 研究区示意图

## 1.2 气象要素观测

观测期间研究区每天的地面常规气象要素均来自安装于高寨村的 FR210 自动气象站。自动气象站观测项目有最高温度、最低温度、风速、日总辐射、日降水量、相对湿度等气象数据。监测时间为 2015 年 12 月 30 日至 2016 年 12 月 9 日。需要说明的是,本研究中气象要素和土壤水分观测时间均为 2015 年 12 月 30 日至 2016 年 12 月 9 日,不足一年时间,故下文称研究时段,以与年周期相区别。

## 1.3 土壤水分参数测定

用土壤容重取样器垂直打入土中,以环刀采集地表及以下间隔 10 cm 深度处土样,带回室内测定土壤饱和含水量、田间持水量、残余含水量、干容重<sup>[16,24]</sup>。用 TST-55 型渗透仪采用变水头渗透试验测定饱和渗透系数<sup>[25]</sup>。这些测定结果中,饱和含水量( $\theta_s$ )、残余含水量( $\theta_r$ )以及饱和导水率( $K_s$ )作为 Hydrus-1D 模型运行的基本土壤水分参数,其余参数如  $\alpha$ ,  $n$  和  $l$  由模型反演获得。

## 1.4 模型的初始条件和边界条件

本研究中,Hydrus-1D 模型初始条件设置为实测的土壤剖面含水量。研究区内仅受大气降水,地面难形成积水,故上边界条件设置为有径流产生的大气边界。由于地下水位埋藏深度远大于观测的土层厚度,且土壤底部风化砂岩排水良好,故下边界条件设定为

自由排水边界。

将 1,3,9 号点设置土壤剖面深度依次为 150 cm,130 cm,150 cm,根据土壤类型特点和实测数据,以及在空间上精细剖分来提高模型的精确度,采用剖面深度 10 cm 进行数据模拟,并选取 1 cm 作为一个空间步长。将剖面划分为 6 层不同介质的土壤,而观测点的设定则按照实际观测位置进行布设。根据实测毛竹根系指标,毛竹根系深度取 60 cm。模型原理及具体操作参见 Hydrus-1D 模型手册<sup>[26]</sup>。

## 1.5 模型评价指标

本文采用以下统计参数评价模型模拟效果,主要有决定系数(coefficient of determination,  $R^2$ )、相对方差(relative error, RE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)和纳什效率系数<sup>[27]</sup>(Nash-Sutcliffe model efficiency, NSE)4 个指标评价模型精度。计算公式如下:

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})(s_i - \bar{s})]^2}{\sum_{i=1}^N (m_i - \bar{m})^2 \sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - s_i)^2} \quad (2)$$

$$RE = \frac{\sum_{i=1}^N m_i}{\sum_{i=1}^N s_i} - 1 \quad (3)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (s_i - m_i)^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2} \quad (4)$$

式中: $s_i, m_i$  依次为第  $i$  个样本的实测土壤水分实测值和模型模拟值; $\bar{s}, \bar{m}$  分别是实测土壤水分的平均值和模型模拟土壤水分的平均值; $N$  为样本数量。以上 3 个评价指标均决定了模拟值与实测值的密切程度,当  $R^2$  越趋向于 1, RMSE 越趋向于 0, RE 越小时,表明模型模拟精度越高;NSE 的范围区间为  $-\infty \sim 1$ ,且当 NSE 越趋向于 1,表明模拟值与实测值的拟合程度较好,可信度较高,一般认为当  $NSE > 0.5$  为可接受的模拟值<sup>[14,28]</sup>。

## 1.6 气候情景模式设定

本研究的气候情景设置主要依据基于政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)关于全球升温 1.5℃ 的特别报告及其相关解读<sup>[29-30]</sup>,再结合文献,考虑到未来气候的可能变化趋势,在保持模型其他参数不变的条件下,只改变降水与气温,形成不同的气候变化情景,在此



基础上进行猫儿山典型小流域人工毛竹林生态水文过程对气候变化响应进行分析。气候情景设定见表 1。在不同气候情景下,通过模拟的日变化、月变化和总量变化,来揭示人工毛竹林的生态水文过程对气候变化的响应。

表 1 气候情景设定

气候情景	降水变化/%	气温增幅/℃
C <sub>0</sub>	0	0
C <sub>1</sub>	+10%	0
C <sub>2</sub>	-10%	0
C <sub>3</sub>	0	1
C <sub>4</sub>	0	+1.5
C <sub>5</sub>	0	+2
C <sub>6</sub>	+10%	+1.5
C <sub>7</sub>	-10%	+1.5

2 结果与分析

2.1 Hydrus-1D 模型土壤水分模拟结果与精度评价

在不考虑气候变化情况下,经过 Hydrus-1D 模型模拟,小流域内 1,3,9 号点不同土层处土壤水分的实测值与模拟值的随时间变化特征及拟合情况见图 2,毛竹林植被蒸腾量、土壤蒸发量、径流量和土壤储水量模拟结果见图 3—5。

分析表明,研究时段内 1,3,9 号点植被蒸腾量分别为 673.94,672.77,637.52 mm,土壤蒸发量分别为 175.30,182.10,179.05 mm,径流量分别为 2 239.9,2 200.4,2 169.0 mm,土壤储水量均值分别为 440.18,316.92,466.61 mm。在研究时段内,径流占总降水量的 74.46%,其中底部排水为径流主要成分,占总径流量的 60.76%,即人工毛竹林入渗比例较高,径流以基流为主。蒸腾量、蒸发量占总降水量的比重分别为 22.36%和 6.04%,其中植被蒸腾约占总蒸散量的 78.72%。

各观测点不同土层土壤水分的实测值与模拟值的对比结果显示:各层土壤剖面处实测值中,除个别值与模拟值相差较大外,整体模拟结果较好。将流域内各观测点实测土壤水分与 Hydrus-1D 模型模拟得出的不同土层土壤水分结果进行评价,结果见表 2。可以看出,整体模拟结果在可接受的范围内,Hydrus-1D 模型能够准确反映出流域内土壤水分随时间的变化特征,可以作为气候变化分析的模型基础。

2.2 流域生态水文过程对气候变化的响应

2.2.1 蒸散发量 图 6—7 为不同气候情景模式下研究时段蒸腾量和蒸发量变化情况。就全研究时段而言,除降水减少气温不变情境(C<sub>2</sub>)外,蒸发蒸腾均增加,其中降水不变气温升高 2℃时(C<sub>5</sub>)增幅最大,即气温控制蒸发和蒸腾的增幅。3 个观测点中,蒸腾量和蒸发量平均增加值为 21.587 mm 和 5.617 mm,平均增幅 3.26%和 3.39%。就蒸散量模拟值的月分配来说,土壤蒸发量与植被蒸腾量具有相同的月变化趋势,且冬季增幅大于夏季增幅,即气候变化更容易影响冬季的水分蒸散。

总体而言,研究时间段内气候变化会引起流域内蒸散量的改变,降水与蒸散量存在正相关关系,即蒸散量随降水增加而增加,反之则减少;气温升高同样会导致蒸散量上升,与降水相比,变化幅度更大,即蒸散发量对气温升高的响应更敏感。降水—气温耦合情景下(C<sub>6</sub>,C<sub>7</sub>),蒸散发量月值的变化规律不明显,反映出区域气候变化对蒸散发影响的复杂性。

2.2.2 径流量 由图 8 可见,径流变化趋势与降水一致,与气温相反,其中径流对降水减少气温升高时(C<sub>7</sub>)最敏感,3 个观测点的径流量平均减少值为 302.848 mm,平均减幅 13.75%。就月值来说,气温不变时,降水变化更多地影响夏季径流,夏季径流的增减幅度是冬季的数十倍。仅气温发生变化时,冬季径流更易受到影响。

2.2.3 土壤储水量 图 9 为研究时段各观测点土壤储水量变化特征。土壤储水量与径流的变化趋势一致,也受降水影响明显,受气温变化的影响不大。其中土壤储水量对降水减少气温升高时最敏感,3 个观测点平均减少值为 6.054 mm,平均减幅 1.59%。月变化情况则是降水对夏季土壤储水量影响大于冬季,气温的影响则更多的是对冬季土壤储水量造成波动。降水—气温耦合情况下,总体表现为冬季土壤水量更易受影响。研究时间段内降水与气温对土壤储水量的影响效果相反。气温的升高可以制约降水增加的补充作用,进而引起土壤储水量的小幅下降。而降水减少与气温升高可加快土壤储水量的流失。

综上所述,由于研究区地处湿润地区,水分较为充足,径流量和土壤储水量均受降水量影响明显,而植被蒸腾和土壤蒸发则受气温影响明显。

此外,降水增加可以抵消部分气温升高带来的影响(C<sub>6</sub>),且维持总体指标的略微增加。而降水的减少再叠加气温升高,将出现径流的大幅度下降,降水变化的效应大于气温变化的效应。即降水为主,气温为辅,降水是影响径流量变化的主要驱动要素。

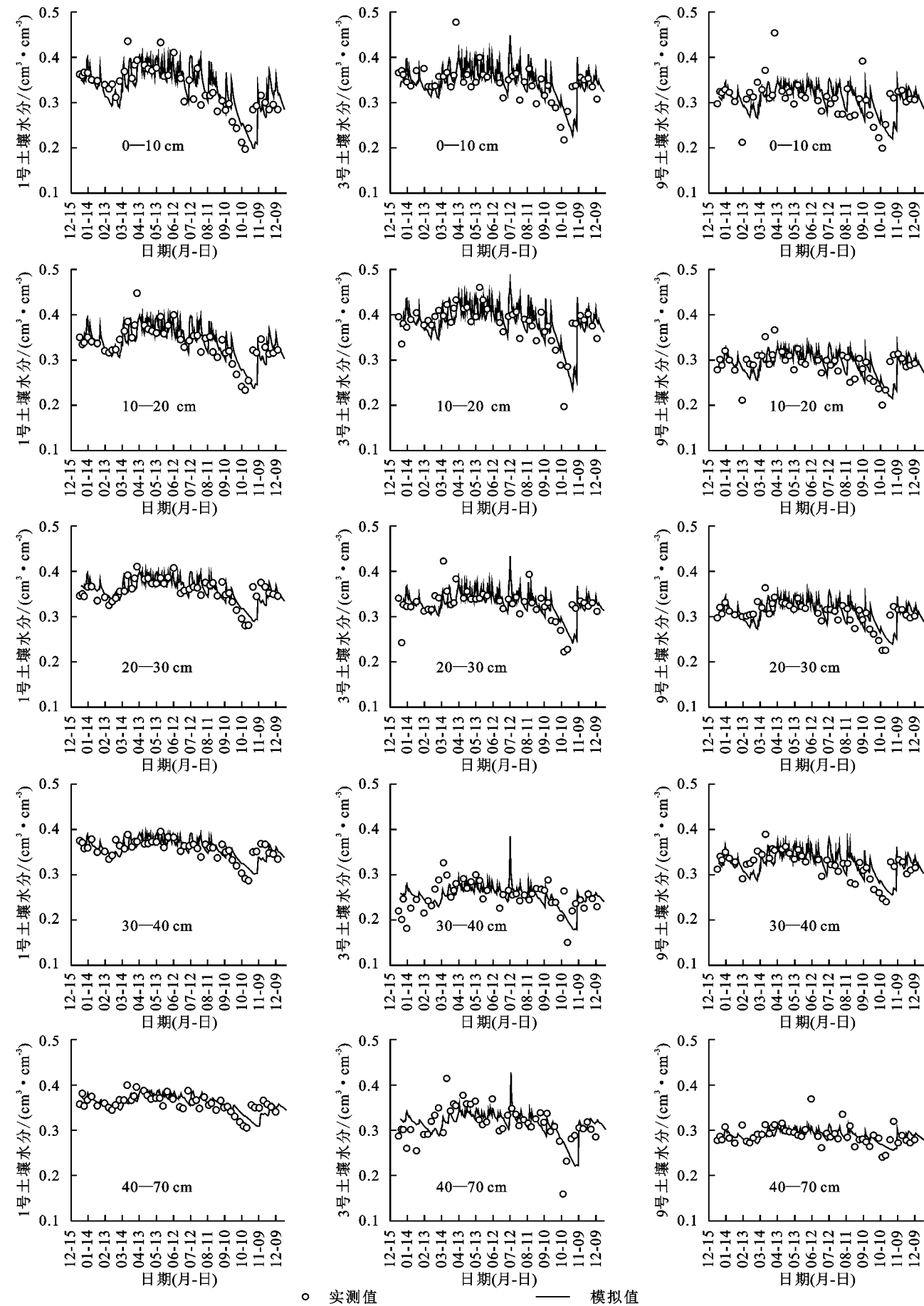


图 2 土壤水分实测值与模拟值对比

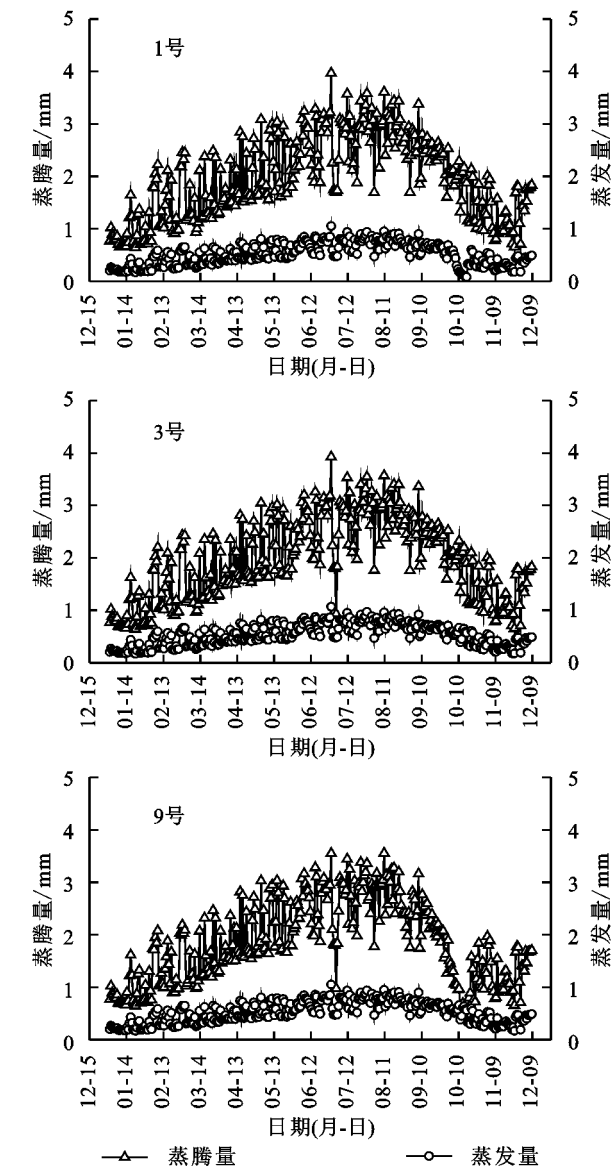


图 3 蒸散发量逐日变化

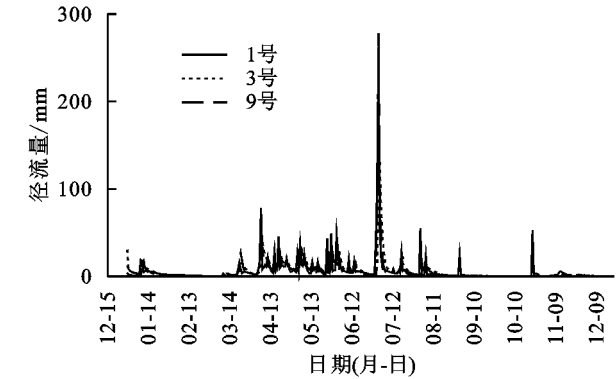


图 4 径流量逐日变化

### 3 讨论

#### 3.1 Hydrus-1D 模型对于人工毛竹林生态水文过程的适用性

本研究基于实测典型流域人工毛竹林土壤水分数据对 Hydrus-1D 模型进行部分参数反演后,模拟结果和

决定系数( $R^2$ )、相对方差(RE)、均方根误差(RMSE)和纳什效率系数(NSE)表明模型可以较好地反映土壤水分的时空变化特征,尽管个别土层土壤水分的模拟值与实测值吻合度较低,但总体不影响对流域水分的模拟。以此模型和参数进行气候变化的响应分析,结果具有一定的科学性。此外,在现状情况(不考虑气候变化)下模拟结果表明,人工毛竹林蒸散发量占降水量的 28.4%,其中以植被蒸腾为主,即毛竹林水分消耗水平不高,且径流以基流为主,水土保持效果良好。因此,人工毛竹林在水分消耗和水土保持方面的效用,应重新评估。

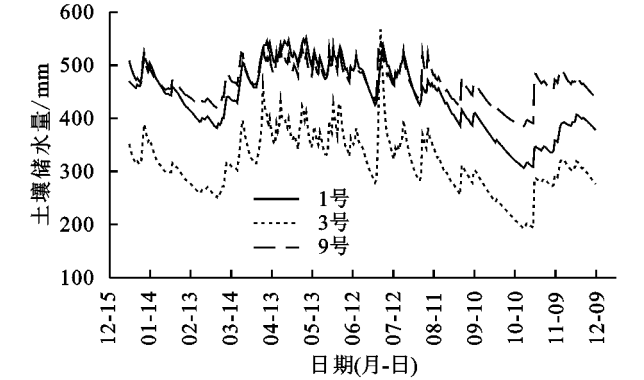


图 5 土壤储水量逐日变化

表 2 土壤水分模拟评价指标

深度/cm		0—10	10—20	20—30	30—40	40—70
1 号点	$R^2$	0.83	0.87	0.78	0.75	0.76
	RE	−0.001	−0.0002	0.0006	0.0009	0.0008
	RMSE	0.021	0.014	0.012	0.011	0.009
	NSE	0.89	0.87	0.78	0.75	0.76
2 号点	$R^2$	0.64	0.78	0.50	0.18	0.47
	RE	0.0005	0.0006	−0.0003	0.0002	0.0003
	RMSE	0.023	0.020	0.024	0.028	0.029
	NSE	0.64	0.78	0.50	0.22	0.48
3 号点	$R^2$	0.42	0.61	0.78	0.69	0.44
	RE	−0.0006	−0.0008	−0.0009	−0.0011	−0.0002
	RMSE	0.031	0.019	0.012	0.016	0.013
	NSE	0.42	0.61	0.78	0.69	0.44

#### 3.2 生态水文过程对气候变化的响应

气候变化是影响流域水循环的主要因素,而气温和降水的变化对其响应最为明显<sup>[31]</sup>。本研究发现,各水文要素中径流量对降水变化最敏感,而蒸发受降水的影响较弱。另外,各水文要素随气温升高表现出较明显的响应,其中气温对蒸散量的作用最显著。然而,有研究表明全球变暖引发的气温升高、降水减少,导致流域径流量存在先增加后降低的倾向<sup>[32]</sup>。因此,区域气候变化对流域水文过程的响应是相对复杂的,研究时段的长短在一定程度上会影响研究结果的完整性。也有研究表明,气候变化也可通过其他途径来影响流域水循环环节,如罗宇等发现日照时数是影

响延河流域的主要气象因子<sup>[33]</sup>。此外,本研究得出气温是蒸散量的主要驱动因素,与韩丽等<sup>[17]</sup>发现的降水是蒸散量的主要制约因子的结论说明,水分和热量的供给条件会影响蒸散量对气候变化的响应。就

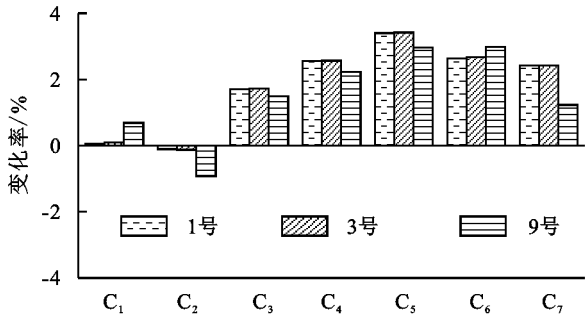


图 6 研究时段蒸腾量变化情况

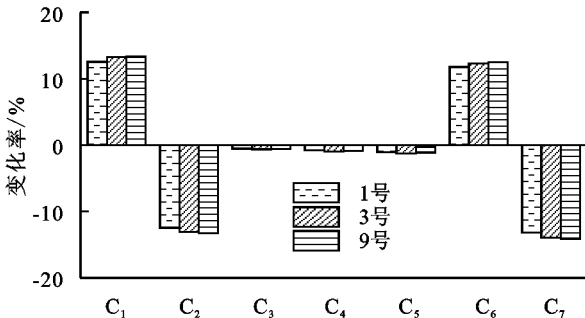


图 8 研究时段径流量变化情况

**3.3 不同气候区和植被类型对气候变化响应的比较**  
本研究区属于湿润区,所得结论与干旱区<sup>[18]</sup>、半干旱区<sup>[19]</sup>和半湿润区<sup>[20]</sup>的流域水文过程对气候变化响应的研究成果(表 3)基本一致,但变化幅度存在差异,这表明虽处不同流域,气候变化对水文过程的响应机制相近,但从水文要素的响应强度来看,仍存在

不同月份而言,降水易于影响夏季径流,而气温则可能影响冬季径流。即未来降水变化或者气温变化,对流域径流的影响时段不同,受此影响的行业或生态效应也是会有所差异,这方面值得深入研究。

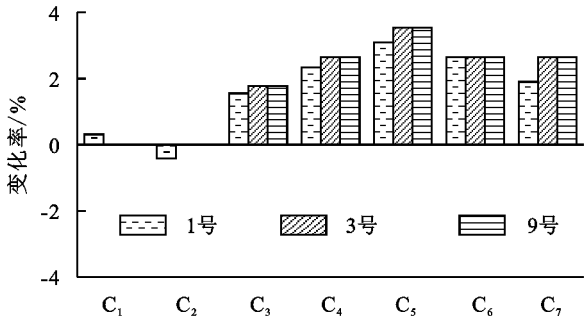


图 7 研究时段蒸发量变化情况

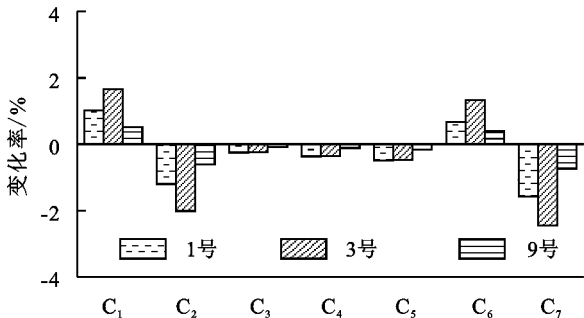


图 9 研究时段土壤储水量变化情况

表 3 不同气候区水文过程对气候变化的响应

气候变化情景	径流量/%				蒸散发量/%			
	本研究区	干旱区	半干旱区	半湿润区	本研究区	干旱区	半干旱区	半湿润区
$T+0;P+5\%$	—	—	—	14.68	—	—	—	2.47
$T+0;P+10\%$	+13.06	+89	+23.68	—	0.24	+3	+3.11	—
$T+0;P-10\%$	-12.94	-60	-21.04	—	-0.33	-4	-4.37	—
$T+1^{\circ}\text{C};P+0$	-0.58	-5	-1.44	-2.59	1.65	1.5	+0.46	0.65
$T-1^{\circ}\text{C};P+0$	—	+11	+1.41	—	—	3	-0.42	—
$T+2^{\circ}\text{C};P+0$	-1.15	—	-2.87	-6.60	3.29	—	+1.00	1.69
$T-2^{\circ}\text{C};P+0$	—	—	+3.00	—	—	—	-0.97	—
$T+3^{\circ}\text{C};P+0$	—	—	—	-9.09	—	—	—	2.35

注:  $T$  表示温度;  $P$  表示降水量。

从植被类型的角度看,对于同处于湿润区,主要土地利用类型为耕地、林地和草地的流域水文过程对气候变化响应的结果<sup>[22]</sup>反映出,径流量和土壤蒸发量对降水变化的敏感性较高,而受气温变化影响较弱。这与本研究结果基本一致,但也要注意,单一树种对于气候变化的响应可能不同于植被类型较复

杂的林分,流域尺度的大小也是影响因素之一。

本研究仅对人工毛竹林的生态水文过程对气候变化的响应进行了分析,也分析了不同月份的差异,但深度仍显不足。气候变化往往表现为不同的季节有不同的变化强度,但由于资料所限,本次研究的不同气候变化情景中降水气温变化的季节差异没有体现。最后,为



简化模拟过程,本次研究中没有考虑毛竹根系和冠层参数的季节变化,一定程度上影响模拟精度。

## 4 结论

(1) Hydrus-1D 模型应用于人工毛竹林具有一定的精度保证。在研究时段内,人工毛竹林径流占总降水量的 74.46%,其中基流(底部排水)占总径流量的 60.76%,人工毛竹林水土保持作用不容忽视。蒸腾量、蒸发量占总降水量的比重分别为 22.36%和 6.04%,其中植被蒸腾约占总蒸散量的 78.72%,表明毛竹林并非高耗水植被,对区域水资源的影响应重新评估。

(2) 就全研究时段而言,气温升高的情景下,蒸发蒸腾量的增幅受气温增幅的影响明显,各月土壤蒸发量与植被蒸腾量均表现为冬季增幅大于夏季增幅。

(3) 径流对降水变化更敏感,其中径流对降水减少气温升高的情景最敏感。气温不变时,降水变化更多地影响夏季径流,夏季径流的增减幅度是冬季的数十倍。仅气温发生变化时,冬季径流更易受到影响。降水的增加可以抵消部分气温升高对径流的影响,并维持径流量的略微增加。降水的减少再叠加气温升高,将出现径流量的大幅度下降。

(4) 土壤储水量受降水影响明显强于气温的影响,在降水减少且气温升高时敏感性最强。降水对夏季土壤储水量的影响大于冬季,气温的影响则更多的是对冬季土壤储水量造成波动。气温—降水耦合情况下,总体表现为冬季土壤储水量易受影响。气温的升高会制约降水增加对土壤储水量的补充作用,进而引起土壤储水量的小幅下降,降水减少与气温升高可加快土壤储水量的流失导致干旱化,表现出水分和热量供给对生态水文过程响应的综合影响。

### 参考文献:

- [1] 刘蔚漪.闽北不同类型毛竹林水文生态功能研究[D].北京:中国林业科学研究院,2011.
- [2] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature: International Weekly Journal of Science*, 2002,419(6903):228-232.
- [3] Oki T, Kanae S. Global Hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006,313(5790):1068-1072.
- [4] Gohari A, Mirchi A, Madani K. System dynamics evaluation of climate change adaptation strategies for water resources management in Central Iran [J]. *Water Resources Management*, 2017,31(5):1413-1434.
- [5] 张利平,曾思栋,夏军,等.漳卫河流域水文循环过程对气候变化的响应[J].*自然资源学报*,2011,26(7):1217-1226.
- [6] Piao S, Ciais P, Huang Y, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010,467(7311):43-51.
- [7] 马欢,杨大文,雷慧闻,等. Hydrus-1D 模型在田间水循环规律分析中的应用及改进[J].*农业工程学报*,2011,27(3):6-12.
- [8] 李蓝君,宋孝玉,夏露,等.黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J].*农业工程学报*,2018,34(20):148-159.
- [9] 王国庆,李迷,金君良,等.涪江流域径流变化趋势及其对气候变化的响应[J].*水文*,2012,32(1):22-28.
- [10] Notter B, Macmillan L, Viviroli D, et al. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region[J]. *Journal of Hydrology*, 2007,343(3/4):266-278.
- [11] 任利东,黄明斌,樊军.不同类型层状土壤持水能力的研究[J].*农业工程学报*,2013,29(19):105-111.
- [12] 刘建军,王全九,王卫华,等.利用 Hydrus-1D 反推土壤水力参数方法分析[J].*世界科技研究与发展*,2010,32(2):173-175.
- [13] 许晓梁,陈孝兵,陈力.不同目标函数对土壤水力参数反演效果评价[J].*水电能源科学*[J],2018,36(10):140-143,169.
- [14] 王鹏,宋献方,袁瑞强,等.基于 Hydrus-1D 模型的农田 SPAC 系统水分通量估算:以山西省运城市董村农场为例[J].*地理研究*,2011,30(4):622-634.
- [15] Lyu S, Chen W, Wen X, et al. Integration of HYDRUS-1D and MODFLOW for evaluating the dynamics of salts and nitrogen in groundwater under long-term reclaimed water irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2019,37(1):35-47.
- [16] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J].*土壤学报*,2020,57(2):347-358.
- [17] 韩丽,宋克超,张文江,等.长江源头流域水文要素时空变化及对气候因子的响应[J].*山地学报*,2017,35(2):129-141.
- [18] 张淑兰,于澎涛,张海军,等.气候变化对干旱缺水地区中尺度流域水文过程的影响[J].*干旱区资源与环境*, 2013,27(10):70-74.
- [19] 于磊,顾臻,李建新,等.基于 SWAT 模型的中尺度流域气候变化水文响应研究[J].*水土保持通报*,2008,28(4):152-154.
- [20] 史晓亮,杨志勇,吕杰,等.滦河流域气候变化的水文响应研究[J].*水土保持研究*,2016,23(2):123-127.
- [21] 许海丽,潘云,宫辉力,等.1959—2000 年妫水河流域气候变化与水文响应分析[J].*水土保持研究*,2012,19(2):43-47.
- [22] 李云良,张奇,李相虎,等.鄱阳湖流域水文效应对气候变化的响应[J].*长江流域资源与环境*,2013,22(10):1339-1347.



- ervation[J]. Bioscience, 1981, 31(2): 131-134.
- [7] Bruun H H. Patterns of species richness in dry grass-land patches in an agricultural landscape[J]. Ecography, 2000, 23(6): 641-650.
- [8] 高俊峰, 马克明, 冯宗炜. 景观组成、结构和梯度格局对植物多样性的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1087-1094.
- [9] 任梅. 基于景观生态分析的山地城市绿地格局研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2018.
- [10] 张瑾琿, 王志泰, 邢龙. 基于空间分析法的喀斯特山体公园空间承载力及提升策略: 以黔灵山公园为例[J]. 中国园林, 2020, 36(3): 120-125.
- [11] 丁妮, 吕徐. 喀斯特山地城市绿地景观格局分析[J]. 北方园艺, 2020(3): 85-92.
- [12] 伍斌, 王志杰, 潘远珍. 基于 GIS 的安顺市景观格局空间梯度分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 214-223.
- [13] 姚岚, 吴次芳, 陆张维. 喀斯特地区城镇化质量与土地利用系统健康协同演化关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 768-778.
- [14] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [15] 李雪冬, 杨广斌, 周越, 等. 基于 3S 技术的岩溶地区城市景观生态安全评价: 以贵阳市为例[J]. 中国岩溶, 2016, 35(3): 340-348.
- [16] 林丽平. 喀斯特贵阳市森林物种多样性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [17] 韩会庆, 王喆, 张英佳, 等. 2005—2015 年贵阳市生境退化程度对土地利用变化的响应[J]. 中国岩溶, 2018, 37(2): 185-191.
- [18] 刘玺, 何守阳, 刘贝贝. 岩溶山区城镇化进程的土地利用景观格局演变特征: 以贵阳市为例[J]. 地球与环境, 2019, 47(4): 527-536.
- [19] 佟济宏. 北京市主城区城市森林空间分布及结构特征分析[D]. 北京: 北京林业大学, 2018.
- [20] 李洋. 重庆市主城区城市森林分类及特征分析[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [21] 冯佰香, 李加林, 何改丽, 等. 农村居民点时空变化特征及驱动力分析: 以宁波市北仑区为例[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 523-533.
- [22] 姜广辉, 何新, 马雯秋, 等. 基于空间自相关的农村居民点空间格局演变及其分区[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 265-273.
- [23] 陈宗峰, 李裕瑞, 刘彦随. 黄土丘陵沟壑区乡村聚落分布格局特征与类型[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 266-274, 316.
- [24] 马林兵, 魏慧丽, 曹小曙. 基于 FCD 数据的城市有效路网密度评价: 以广州荔湾区和越秀区为例[J]. 地理研究, 2015, 34(3): 541-554.
- [25] 范敏, 彭羽, 王庆慧, 等. 景观格局与植物多样性的关系及其空间尺度效应: 以浑善达克沙地为例[J]. 生态学报, 2018, 38(7): 2450-2461.

(上接第 196 页)

- [23] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015 年中国气候变化和人类活动对植被 NDVI 变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961-974.
- [24] 许静. 不同试验方法测定田间持水量的对比研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] 水利部. 土工试验方法标准[S]. GB/T50123-2019, 2019.
- [26] Šimůnek J, Šejna M, Saito H, et al. The Hydrus-1D software package for simulating the movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media; Manual Version 4.17[Z]. Riverside, CA, USA: Univeristy of California, 2013.
- [27] Nash J E, Sutcliffe J V. River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles-ScienceDirect[J]. Journal of Hydrology, 1970, 10(3): 282-290.
- [28] 吴辰, 郝振纯, 鲁承阳, 等. 五道沟地区土壤水分动态变化规律及模拟研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(9): 138-142.
- [29] IPCC. Special report on global warming of 1.5°C[M]. UK: Cambridge University Press, 2018.
- [30] 苏勃, 高学杰, 效存德. IPCC《全球 1.5°C 增暖特别报告》冰冻圈变化及其影响解读[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 395-404.
- [31] 窦小东, 黄玮, 易琦, 等. LUCC 及气候变化对龙川江流域径流的影响[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 7-15.
- [32] 班春广, 徐宗学, 苟娇娇, 等. 1973—2015 年年楚河上游流域径流变化趋势及驱动因素分析[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2019, 55(6): 748-754.
- [33] 罗宇, 穆兴民, 高鹏, 等. 延河流域潜在蒸散发时空变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 306-313.