

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdk.2022.0074

吕爱锋,王蕾,曲波.我国植被冠层降水截留研究进展[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(4):724-736. LYU A F, WANG L, QU B. Research progress of vegetation canopy interception in China[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 724-736. (in Chinese)

# 我国植被冠层降水截留研究进展

吕爱锋<sup>1,2</sup>, 王蕾<sup>1,2</sup>, 曲波<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 加拿大蒙特利尔大学, 蒙特利尔 H3T 1J4)

**摘要:** 植被冠层通过对降水的拦截可以改变降水的数量及空间分布、调节地表径流,进而影响生态系统的水分循环。冠层截留过程极易受到多种因素的影响,且不同植被的冠层截留具有差异性。在全球变化的背景下,降水变异性的增加、植被的物候效应及土地利用变化深刻影响着水循环的各个环节,也会进一步对植被冠层截留造成影响。对于植被冠层截留测定方法有人工模拟法和间接观测法,冠层截留模型的研究往往以间接观测结果作为基础。当前我国研究的冠层截留模型主要分为3类:经验模型基于实测资料可揭示不同影响因素与冠层截留的关系;理论模型侧重于冠层截流内在机制,但对于研究者的数学计算能力要求较高;半经验半理论模型参数较少且具有相对明确的物理意义,因此在研究中得到广泛应用。未来我国冠层截留研究可重点关注草本植被冠层截留及变化、结合全球尺度的遥感数据进行方法改进以及冠层截留模型与全球环境变化模型耦合等方面。

**关键词:** 冠层截留;影响因素;冠层截留模型;全球变化;综述

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



植被是生态系统的主要组成部分<sup>[1]</sup>,其对水分的吸附、拦截等功能在降水再分配过程中具有重要作用。在降水过程中,植被对降水的再分配体现为冠层截留、茎干流以及穿透降水3个方面。作为降水再分配的首个环节,冠层截留通过对降水的拦截改变了到达地面的降水数量及空间分布,进而在调节地表径流中发挥了极为重要的作用,同时也影响着地表各系统之间的水热平衡及物质的循环与分配<sup>[2-3]</sup>。

我国地域辽阔,地跨众多的温度带和干湿地区,植被类型多种多样,植被冠层截留也表现出明显的空间差异。目前,我国学者在植被冠层截留研究领域已经开展了大量工作<sup>[4]</sup>。主要围绕探究植被冠层截留机理<sup>[5-6]</sup>、研究和改进冠层截留测定方法<sup>[7-8]</sup>以及冠层截留模型构建<sup>[9-10]</sup>3大方面。由于冠层截留的影响因素多,不同学者<sup>[11-12]</sup>基于植被冠层截留规律对截留影响因素的探究关注点呈现明显差异性,

这为冠层截留容量的准确测定带来极大的挑战。就测定方法而言,部分研究<sup>[13-15]</sup>也发现各类方法对于植被的适用性表现不同。我国冠层截留模型研究起步虽晚,但在经验和半经验模型的研发和应用已经相对成熟,尤其体现在特定区域内半经验半理论模型的参数优化这一方面<sup>[9]</sup>。因此,针对截留因素、测定方法、模型应用等研究现状进行分析,对于正确认识冠层截留对陆地水循环的影响具有极为重要的现实意义,有助于植被冠层截留领域研究的深入和发展。

## 1 植被冠层截留及影响因素

### 1.1 植被冠层截留过程及重要参数

降水进入植被覆盖的区域后,由于受到植被枝叶的拦截作用,被分为冠层截留(含附加截留)、茎干流以及穿透降水3部分。植被冠层截留是指在降水下落过程中植被冠层吸附、拦截降水的这一过程,通

收稿日期:2021-12-03 修回日期:2022-07-05 网络出版时间:2022-07-14

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220713.1132.008.html

基金项目:国家自然科学基金项目(41671026);青海省重大科技专项(2019-SF-A4-1);青海省自然科学基金项目(2019-ZJ-7020)

作者简介:吕爱锋(1977—),男,山东济南人,副研究员,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:lvaf@igsrr.ac.cn

常以冠层截留量或冠层截留率来衡量<sup>[4]</sup>。一般而言,植被冠层截留只发生于植被覆盖的区域,对于裸露区域的截留量通常视为零<sup>[16]</sup>。

植被盖度/郁闭度和叶面积指数(LAI)是植被冠层截留差异性研究关注度最高的2个参数<sup>[17-19]</sup>,其作为反映作物群体生长结构的重要参数,同样可应用于衡量植被截留过程中植被的吸附水量,因此在冠层截留研究中得到广泛应用<sup>[20-23]</sup>。

## 1.2 植被冠层截留的影响因素

冠层截留是一个复杂的过程,主要受到降水特性、植被特征以及气象条件等3方面因素的影响。此外,降水前期枝叶湿度、林分郁闭度等也会影响植被冠层的截留过程。

### 1.2.1 降水特性

降水作为植被冠层截留过程中的起始环节,在降水总量、降水历时、强度等降水特性方面影响冠层截留量<sup>[4]</sup>。万艳芳等<sup>[13]</sup>以青海云杉为研究对象,研究林木冠层截留规律发现:在 $\leq 5$  mm的雨量级中,青海云杉的截留量(28.7 mm)和截留率(67.8%)达到研究时段的最大值;但在降雨量 $> 30$  mm时,截留率达

到最低值(10.0%)。在此基础上,凡国华等<sup>[14]</sup>利用二次函数拟合了长三角地区的马尾松林的降水截留率,重点描述了降水强度与林冠最大动能承受限度之间的关系。考虑到降水的季节变异性,张平等<sup>[15]</sup>在研究灌丛水分拦截能力时重点关注了冬春季节降水形态变化特征,研究发现固态降水截留率大于液态降水的截留率,植被冠层在相对干燥状态下可以拦截大部分的降水。盛后财等<sup>[24]</sup>在天然落叶松截留研究中证实次降水的冠层截留率取决于降水前期的冠层干燥程度。多项研究<sup>[25-27]</sup>发现降水初期冠层截留量与降水总量呈明显的正比关系,随着降水的持续进行,降水总量不断增加,植被冠层吸附水量逐渐达到饱和,此时冠层截留率的增长趋势不断下降,直至植被冠层吸附水量达到饱和,植被的截留量则不再增加或缓慢增加,见图1。“附加截留”是致使截留率在植被吸附水量在饱和状态下缓慢增加的主要原因。附加截留作为植被截留中的重要组成部分之一,它是指降水在截留过程中由于蒸发直接返回到大气中,使得降水未能到达地面,且降水历时越长,蒸发量逐渐增加,引起附加截留量增大,最终导致冠层截留增加。

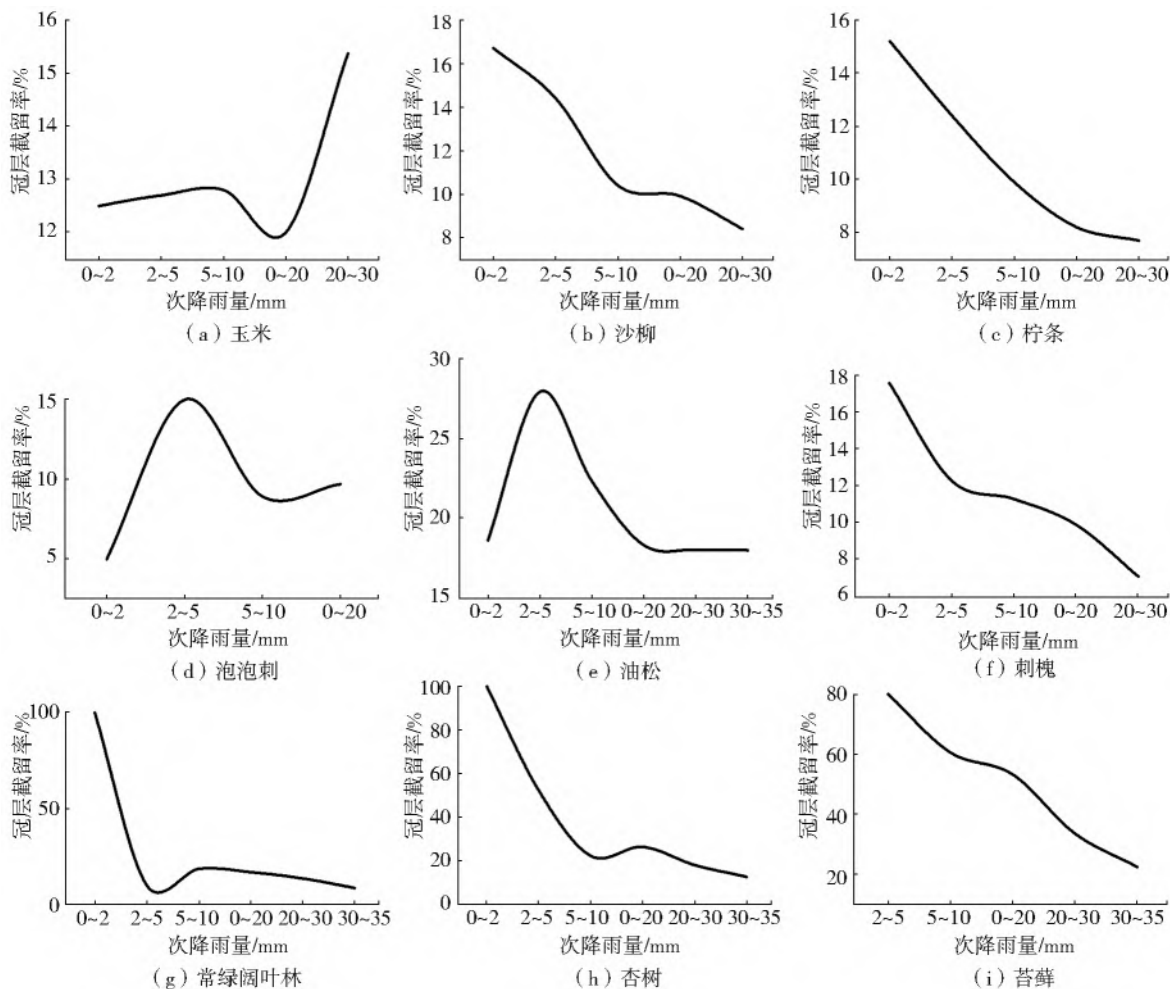


图1 不同植物降水量与冠层截留率

Fig. 1 Relationship between precipitation and canopy interception rate of different plants

注:图中数据来源于文献[13]和文献[28-32]

## 1.2.2 植被特征

植被特征对于冠层截留过程同样具有重要影响。冠层的结构和大小、植被的叶倾角及粗糙程度、空间分布等参数影响到冠层对于降水的拦截作用。

这些参数取决于植被的种类,在林木、草本、灌木和作物中差异明显。根据植被类型的不同,将我国近几十年的冠层截留的研究进行归类整合,结果见表 1。

表 1 不同植被类型冠层截留率以及观测参数

Tab. 1 Canopy interception rate and observation parameters of different vegetation types

植被类型	位置	降水特性		种类	郁闭度或 LAI	平均截留率/%	测定方法	参考文献		
		实际降水观测时间	模拟降水条件							
			雨强 $d$ /(mm·min <sup>-1</sup> )						历时 $t$ /min	
草本	北京朝阳		0.70	1	草地早熟禾	3.35b	16.55	A 模拟降水法	杨全 <sup>[6]</sup>	
					高羊茅	3.97b	18.63			
					结缕草	4.24b	18.39			
	陕西安塞		0.33	3.17	沙打旺	0.88a	12.70	A 磅秤称重法	张光辉等 <sup>[33]</sup>	
					偃麦草	0.28a	35.00			
					披碱草	0.26a	28.50			
青海西宁		0.20	10	细茎冰草	0.23a	18.00	A 模拟降水法	张莹等 <sup>[34]</sup>		
				赖草	0.18a	14.50				
				吉拉柳	0.55a	20.48				
灌木	甘肃南	2011 年 10 月—2012 年 10 月			鲜黄小檗	0.52a	22.45	B 雨量计法	张平等 <sup>[15]</sup>	
					柠条	0.30a	17.00			
	宁夏沙坡头	2002 年 06 月—2002 年 10 月				油蒿	0.73b	26.80	B 雨量计法	王新平等 <sup>[35]</sup>
						沙柳	0.50a	12.80		
	陕西神木	2006 年 01 月—2009 年 12 月				四翅滨藜	0.25a	25.50	A 浸泡法	张莹等 <sup>[34]</sup>
						霸王	0.23a	23.00		
柠条锦鸡儿						0.19a	18.50			
林木	江苏如东	1993 年 01 月—1994 年 12 月			刺槐	0.60a	17.95	B 雨量计法	张金池等 <sup>[37]</sup>	
					水杉	0.90a	25.70			
	宁夏六盘山	2004 年 06 月—2004 年 09 月				辽东栎	0.60a	19.80	B 雨量计法	徐丽宏等 <sup>[7]</sup>
	辽宁抚顺	2005 年 01 月—2008 年 06 月				落叶松	0.88a	16.60	B 雨量计法	盛雪娇等 <sup>[25]</sup>
	陕西汉中	1990 年 01 月—1990 年 12 月				锐齿栎	0.80a	14.00	B 雨量计法	唐臻 <sup>[26]</sup>
	北京密云	2010 年 07 月—2010 年 10 月				栓皮栎	0.62a	20.17	B 雨量计法	李佳等 <sup>[38]</sup>
作物	黑龙江老山	2003 年 06 月—2003 年 10 月				水曲柳	0.75a	17.41	B 雨量计法	党宏忠等 <sup>[39]</sup>
	北京郊区	2008 年 06 月—2008 年 09 月				杏树	0.70a	16.80	B 气象站观测法	任亮等 <sup>[29]</sup>
	河北隆化	1984 年 06 月—1984 年 10 月				油松	0.70a	23.00	B 雨量计法	董世仁等 <sup>[40]</sup>
	辽宁喀左		0.25	60	春小麦	3.50b	27.50	A 模拟降水法	杜尧东等 <sup>[41]</sup>	
	广东广州		2.00	20	甘蔗	4.06b	3.40	A 模拟降水法	余长洪等 <sup>[42]</sup>	
	陕西长武	2013 年 07 月—2013 年 09 月				玉米	2.15b	13.30	B 气象站观测法	韩雪等 <sup>[2]</sup>
陕西杨凌		0.66	60	大豆	4.83b	1.44	A 喷雾法	徐宁等 <sup>[43]</sup>		
				谷子	3.38b	0.86	A 喷雾法	马波等 <sup>[31]</sup>		
陕西杨凌		0.30	至水珠滴落	冬小麦	5.99b	2.03				

注:a 表示郁闭度测定数值,b 为 LAI 值;A 和 B 分别表示人工模拟和间接观测法。

在相似的地理环境下,同种草本或灌木的冠层截留率差别不大。就不同植被类型而言,例如草本和林木,在相同模拟降水条件(2 mm)下,植被的截

留率随着生长时间的增加呈上升趋势。张莹等<sup>[34]</sup>实验测得生长期为 3、4、5 个月的偃麦草的截留率分别为 35.0%、42.5%、57.0%。马波等<sup>[31]</sup>以谷子、小

麦为对象研究作物的冠层截留过程,发现谷子在其全生育期内的平均冠层截留量占总降水比例(冠层截留率)为 0.52%,而冬小麦的在其全生育期内的平均冠层截留率可达 1.64%,并且截留量随着作物的生长而增加。由于植被冠层结构大小、植株高度、叶片特征以及空间分布等参数不同,二者对于降水量的拦截作用存在较为明显的差异。在同一植被类型的森林冠层中,对于降水的截留作用也呈现树种差异性。凡国华等<sup>[14]</sup>、巩合德等<sup>[28]</sup>的研究中发现,由于针叶林的叶片对于水量吸附能力较强,马尾松在降水期间对于冠层的截留率可达 25.38%,而亚热带常绿阔叶林冠层截留率只有 15.8%。周彬等<sup>[30]</sup>及田风霞等<sup>[27]</sup>的研究显示,在郁闭度相同的情况下,我国油松的林冠截留率可达 38.35%,稍高于青海云杉林的平均林冠截留率 33.9%。这表明同一树种对降水的拦截同样存在明显差异。

### 1.2.3 其他气象条件

在两次降水期间气象要素持续影响冠层的蒸发速率进而影响冠层的干燥程度,最终对冠层拦截降水产生影响<sup>[24,30]</sup>。气温下降会减少冠层截留的蒸发及植物的蒸腾<sup>[44]</sup>。空气的水汽差以及叶表面与空气的相对温差也会使得单位叶面积的蒸发损失呈现不同程度的差异。有学者研究了风对于冠层截留的主要影响:一方面风会改变植被的机械运动,植被摇动使雨滴快速降落到地表,可导致冠层蓄水量下降 30%~50%<sup>[45]</sup>;另一方面风速也可以通过影响冠层的蒸发速率而增加冠层截留水量<sup>[14]</sup>。

## 2 我国植被冠层截留测定与模拟

### 2.1 冠层截留的测定方法

冠层截留的测定是研究植被水文效应的重要基础<sup>[1]</sup>。总结大量的冠层截留相关文献可知,植被对于降水的截留测定常使用人工模拟和间接观测 2 种方法,并且在森林、草本、灌木以及作物有不同的表现形式,见表 1。

人工模拟法多用于少数草本、灌木及农作物冠层截留水量测定。常用的测定方法有覆盖地表法、浸泡法(也称简易吸水法)等。这些方法大多是在喷灌以及降水模拟器下模拟降水条件,对植被冠层截留进行统计。覆盖地表法是用薄膜或乳胶密封土壤防止渗漏,测量降水量以及实验区的径流量,换算得到冠层截留量的一种方法;浸泡法是将植物剪下,测定浸水前后的重量差确定植被冠层的截留量的方

法。国内很多研究者<sup>[34]</sup>用浸泡法研究草本或农作物的截留能力,并且测量样本叶面积指数及生物量等参数进行分析;卓丽等<sup>[46]</sup>采用浸泡法研究草地的截留能力,对草坪植物的截留规律进行描述;赵伟霞等<sup>[47]</sup>、刘战东等<sup>[48]</sup>同样利用简易吸水法分别研究了耕地草本及冬小麦的冠层截留。这些研究也发现浸泡法能够测定理想条件下植被的最大吸附水量,但测定结果往往大于实际直接观测值。

由于林木、灌木等较高大植被样本难以获取,其截留一般采用气象站设置自记雨量计对树干径流量、林外降水量以及穿透雨量进行测定,并根据水量平衡方程进行截留量的估算,该方法即间接观测法,也称水量平衡法。间接观测法一般需要一段时间的观测资料,通过观测量之间的关系推算冠层的截留量以及截留率规律,在我国的研究中被广泛应用<sup>[35]</sup>。武秀荣等<sup>[49]</sup>、魏曦等<sup>[9]</sup>在模拟青海云杉林、华北落叶松林及人工油松林时使用野外间接观测法研究大气降雨量与林冠最大持水量之间的关系,为模型模拟提供大量数据支持。灌木的测定方法大致与林木相同,但因枝干繁茂茎流量较难测定,主要用林外降水量和穿透雨量对冠层截留量进行估算。为控制环境因子的影响,间接测量法也用于测定矮小植被冠层的截留,这类研究大多是在喷灌以及降水模拟器模拟降水条件下对植被冠层截留进行统计。

众多研究表明,间接测量法可以较好地获得截留水量随时间的动态变化,有利于探究降水强度、降水历时及冠层参数对截留量的影响规律。但由于实际操作过程较为复杂,冠层截留的实际测定结果存在较大的不确定性,尤其是对复杂结构的灌木茎干流的忽视往往会对截留估算产生较大影响。无论是人工模拟还是间接观测法,都无法准确解释冠层截留的内在机理。

### 2.2 冠层截留模型的研究及应用

在近百年的时间里,由于林木冠层截留效应显著,各类模型的开发和应用研究多围绕林冠进行。当前我国对截留模型的研究逐渐成熟且成果丰富,大体可分为经验模型、半经验半理论模型和理论模型 3 种。经验模型一般适用于与研究条件相同或类似的状态;理论模型由于注重冠层截留机制推导而使模型参数较复杂,在冠层截留研究过程中应用较少;相比之下,半经验半理论模型由于参数少且具有相对明确的物理意义,在区域尺度上的林冠截留模拟过程中具有明显的优势。

### 2.2.1 经验模型

经验模型是在已有的统计资料的基础上通过对数据的分析模拟建立起来的统计或回归模型。在植被的冠层截留研究过程中所总结的经验模型大多以一元回归模型为主,概括的形式为

$$I=f(P) \quad (1)$$

式中: $I$  表示截留量; $P$  表示降水量; $f$  为截留量与降水量的函数关系。

对于经验模型的研究除基于实测数据所建立的截留率和降水量的一元回归模型外,崔启武等<sup>[16]</sup>在观测天然红松阔叶林截留过程中还建立了降水量与截留量、截留率的指数以及幂函数模型。曹群根<sup>[50]</sup>利用多因子逐步回归分析法研究毛竹林冠层截留,选用多种函数模型拟合截留量、截留率与降水量的关系,综合考虑林分叶面积、温度等多因子提出多元回归预测模型。

### 2.2.2 半经验半理论模型

在经验模型的基础上发展半经验半理论模型,建立相关截留经验参数可以较大程度地模拟单次降水量的植被冠层拦截状况<sup>[51]</sup>。由于我国对于模型的研究起步较晚,大多数的半经验半理论模型都集中于对国外模型(如 Horton 模型、Gash 模型等)的改进,尤其体现在模型在区域研究中的参数校正。考虑到 Horton 模型只适用于单次降水量超过林冠最大吸附水量与冠层蒸发量之和的降水情况,无法模拟未达到林冠吸附水量饱和状态的降水事件,王彦辉等<sup>[10]</sup>在 1998 年结合我国的实际情况对 Horton 模型进行转换并确定了冠层截留过程中的几个参数,具体模型表述为

$$I_c = I_{cm} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{P}{I_{cm}}\right) \right] + \alpha P \quad (2)$$

式中: $I_c$  为冠层截留量; $I_{cm}$  为林冠最大吸附水量; $P$  为降水量; $\alpha$  为经验参数,且受干燥程度和风速等影响较大,在不同地区取值范围不同,受林分特征影响极大,取值在 0.99~2.90。

由于常规气象数据往往缺乏单次降水历时,并且树体表面的动态变化难以把控,王彦辉等<sup>[10]</sup>附加截留部分转换为降水量的比例进行计算。简化后的模型有助于利用经验数据对森林的截留过程进行模拟和评估。此后,王彦辉等又结合林冠郁闭度与冠层截留的关系,将模式再一次进行改进:

$$I_c = I_{cm} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{PA}{I_{cm}}\right) \right] + eT \quad (3)$$

$$I_{cm} = \alpha A^b \Delta H^c \Delta T^d \quad (4)$$

式中: $T$  为单次降水历时; $e$  为单位时间内蒸发量;

$\Delta H$  为冠层厚度; $A$  为林分郁闭度; $\Delta T$  为前后两次降水时间间隔; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  为经验参数;其余符号含义同前。

此外,Gash 模型也是我国冠层截留模拟与改进研究领域中最常用的基础冠层截留模型之一。Gash 结合 Horton 模型的截留机制,在测定气象要素的基础上,将林冠对于降水的截留分为林冠加湿、林冠饱和和降水后林冠干燥 3 个过程,并且根据降水量与冠层最大吸附水量的关系把降水事件划分为能使林冠达到饱和和吸附状态的降水和不能使林冠达到饱和和吸附状态的降水,分别计算冠层截留吸附量和附加截留量<sup>[52]</sup>。许多学者应用 Gash 模型进行林分冠层研究,均获得了较好的模拟效果,但考虑到 Gash 模型的假定条件与实际情况有明显差异,高婵婵等<sup>[53]</sup>发现在不同时间尺度下利用 Gash 模型模拟的结果均比实际测定结果小,并指出提高模型精度的关键在于区分不同的降水事件。总的来说,Gash 模型的逻辑分析较强,各部分的物理意义明确,能够解释多种降水状态下冠层截留组成,但其设计旨在计算特定降水事件截留量,无法准确反映截留过程。部分研究在利用 Gash 模型的同时对于模型参数进行了敏感性分析,分析结果显示,不同林分参数的敏感性均表现出明显差异<sup>[49]</sup>,这也是 Gash 模型在我国实际应用中需要改进的不足之一。

很多学者基于 Gash 模型在我国的适用性进行修正并应用于实际研究:王馨等<sup>[54]</sup>利用平均降水强度来判断林冠是否饱和,进而确定林冠最大吸附水量;武秀荣等<sup>[49]</sup>通过 Leyton 模型进行回归分析确定林冠的持水能力,由树干茎流与大气降水量的关系确定 Gash 模型输入参数,并在此基础上对于各个参数进行 -50%~50% 的敏感性分析;魏曦等<sup>[9]</sup>研究证实 Gash 模型在针叶林冠层研究中效果理想。

我国的半经验半理论模型仍以截留机制理论分析为基础,结合实测数据建立含有某些可求解的参数的经验公式而构建。该类模型可以根据不同植被类型进行归纳确定参数,计算相对容易,所以模型的应用较为广泛<sup>[55]</sup>,但模型中的参数依旧依靠经验数据而定,存在与经验模型相同的缺陷,并且对于附加截留蒸发评估的不确定性较大。

### 2.2.3 理论模型

当观测资料积累到一定程度后,在经验以及半经验半理论的模型的基础上建立理论模型逐渐成为冠层截留模型研究的主要方向之一。在理论模型研

究中,我国学者提出的具有代表性的理论模型有 Liu 模型<sup>[55]</sup>、电路暂态模型<sup>[56]</sup>等。这类模型能够清晰地解释冠层截留、茎干流以及穿透降水 3 个过程,

理论性极强,但模型的构建要求研究者熟练掌握各种数学方法,且具有较高的数学计算能力,这阻碍了理论模型的发展与应用。

表 2 冠层截留模型对比

Tab. 2 Comparison of canopy interception model

模型	代表模型	理论基础及前提条件	模型应用优势	局限性
经验模型	$I_c = a + Bp$ <sup>[50]</sup> $I_c = a + b \ln P$ <sup>[16]</sup> $I_c = a \exp(hP)$ <sup>[16]</sup>	通过已有数据模拟降水影响因素与截留量的函数关系。应用过程要求拥有大量实测降水-截留统计资料	形式简单、不需要复杂的理论推导和数学计算	适用于相同研究条件下的冠层截留结果,模型参数的局限性大。该类模型是在截留结果的基础上建立的,无法解释冠层截留过程及影响因素
半经验半理论模型	改进的 Horton 模型 <sup>[10]</sup> 王彦辉等模型 <sup>[10]</sup> 改进的 Gash 模型 <sup>[9,49]</sup>	以截留机制理论分析为基础,结合实测数据建立含有某些可求解的参数的经验公式构建。吸附水量由冠层蓄水量与降水量表示。蒸发量为降水历时、蒸发强度的函数	针对于不同植被类型实测资料进行总结概括确定参数,具有一定的物理基础。通过数据资料确定的参数较少,计算相对容易,模型的应用较为广泛	模型中的参数依靠经验数据而定,没有完全摆脱经验模型的缺陷。附加截留的蒸发项参数评估难度较大,不确定性较高
理论模型	Liu 模型 <sup>[55]</sup> 电路暂态模型 <sup>[56]</sup>	以研究客观实体为基础,借用数学方法进行模型构建。模型应用要求较高的数学计算能力	参数通过数学计算确定,不受区域差异性的限制,模型针对冠层降水分配过程,分别总结出冠层截留、树干径流、穿透降水 3 部分的具体公式,表述清晰、理论性强	参数确定以及模型应用计算过程细化,求解复杂且对数据的精度要求较高

### 3 全球变化背景下的植被冠层截留变化研究

在全球变化大背景下,不论是气候变化还是土地利用变化均会直接或间接地对区域的冠层截留过程产生影响。

#### 3.1 水分循环的变化深刻影响植被冠层的截留率

据 IPCC 第 5 次评估报告及相关研究<sup>[57]</sup>可知,中国的气候变暖趋势与全球保持一致,且由于强降水的增加以及小降水事件的减少,全球的降水强度呈现增加趋势<sup>[58-59]</sup>,我国过去几十年的降水强度也在显著增强<sup>[60-61]</sup>。降水的改变深刻影响着植被冠层的截留效率。此外,QU 等<sup>[62]</sup>研究证实在不考虑植被的生理调控的情况下,冠层截留蒸发速率要高于传统意义上的蒸散发,其面对气温、空气湿度以及太阳辐射等气象环境因子的显著变化也会产生积极响应。吴艳宏等<sup>[63]</sup>、崔胜辉等<sup>[64]</sup>关注了环境因子相互作用的内在机制,其研究表明气温的升高将加速大气环流过程,大气环流变化将引起降水总量及其强度、频率的变化,以及空气湿度、风速以及太阳辐射强迫的变化,进而导致冠层截留受区域的气候的影响发生显著变化。

#### 3.2 植被的物候效应可能改变植被拦截降水的能力

郑景云等<sup>[65]</sup>研究了近 40 年植物的物候响应发现气候变化对植被冠层截留的影响还体现在气温升高会导致植被春、秋季节变得活跃,加速并延长植被生长发育期<sup>[66]</sup>,进而增加植被覆盖面积或延长植被覆盖地表的时间<sup>[67-68]</sup>。植被叶面积与冠层截留水量密切相关,我国植被覆盖度的变化必定会影响区域的冠层截留效应<sup>[69]</sup>。气候也是决定植被类型分布的主要因素之一,朴世龙等<sup>[70]</sup>、刘国华等<sup>[71]</sup>研究发现未来气候变化将对森林、草地等生态系统造成温度及水分胁迫,强烈地改变生态系统的结构和物种组成,同时有可能改变我国植被的分布规律。不同植被类型对降水的拦截具有显著的差异性,生态系统中的植被结构越复杂拦截的降水量越大。植被类型、结构及其分布规律的变化也会导致冠层截留产生相应变化。赵茂盛等<sup>[72]</sup>分析了气候变化的环境影响,结果认为增温在一定程度上会加剧土壤干燥程度,从而抑制地表植被的生长,尤其体现在生态环境脆弱地区。

#### 3.2 土地利用/覆盖变化(LUCC)直接影响冠层截留

土地利用/覆盖变化既受到全球变化的影响,又

驱动着全球环境不断变化。为满足人口不断增长的需求,全球土地利用呈现由森林向农田转化的基本趋势<sup>[5,73]</sup>,邓慧平<sup>[44]</sup>研究发现植被的减少会降低蒸发和截留。尤其在青藏高原地区,不同的轮牧制度在改变地表覆盖的同时,也通过草本的截留变异改变土壤水的时空分布。范月君等<sup>[74]</sup>分别从轻度、中度、重度放牧强度研究了其对三江源地区植被冠层截留容量的影响,研究结果发现在不同放牧干扰强度下单位面积截留量呈现极大的差异,且不同草本类型的截留容量随放牧干扰强度呈增加或减少趋势。

此外,刘春葵<sup>[3]</sup>指出 LUCC 除了直接改变地表下垫面覆盖以外,还通过影响区域大气成分改变局地区域的小气候,其中最直接的影响就是化石燃料燃烧、汽车尾气排放等增加了大气中气溶胶的浓度;城市热岛效应造成局部地区气温上升,增加区域蒸发量促使降水形成。城市化的建设还会加大地表板结程度,进而削弱地表辐射影响植被截留<sup>[75]</sup>。

## 4 讨论与展望

植被的冠层截留是陆地水循环的重要组成部分,其受到降水、植被和风速等多种因素的影响。我国学者针对不同植被类型选用人工模拟观测或水量平衡进行截留容量的测定,为大尺度冠层截留估算和观测截留模型的发展提供了重要基础。基于截留观测数据,我国在冠层截留模型方面也取得了较好的进展。目前我国自主构建的冠层截留模型以经验模型为主,半经验与半理论模型方面主要通过改进国外代表模型进行区域性参数校正。综合对我国在观测截留观测、模拟等方面研究进展的分析,有以下几点值得未来关注。

### 4.1 低矮草本植被冠层截留理应受到进一步关注

高寒地区草地退化往往容易造成草原水资源的污染<sup>[74]</sup>。就研究内容而言,当前冠层截留研究对草本、灌木及农作物关注度较低。加强对低矮草本植被的截留相应研究对干旱及高原地区的生态维护尤为重要<sup>[76]</sup>。除此之外,随着城市化进程的不断加快,绿色城市建设中的草坪用水、耗水是水资源管理的内容之一,草本植被作为绿色城市建设的重要组成部分<sup>[77]</sup>,其截留容量的变化具有极为重要的现实意义,理应受到热切关注。

### 4.2 植被冠层截留监测尺度和方法可以结合遥感技术进行深入研究

通过分析国内的冠层截留研究现状及发展动态

可见,森林、草本、灌木以及作物往往根据植被特点选取人工模拟或间接观测 2 种方法进行点状空间尺度的研究,而在较大空间尺度的冠层拦截降水研究中,孙彩虹等<sup>[78]</sup>将冠层截留研究尺度扩展至流域,在此基础上将广东省划分成高、中、低截留区,有效呈现了广东省植被冠层截留的空间变化。林下植被结构及其差异性也是影响区域截留量的不确定性因素之一,在区域水源涵养研究选择观测点进行大尺度的截留模拟计算结果常与实际结果不符<sup>[48,79]</sup>。因此,对于复合植被类型的截留研究和模型建立同样需要开展大量工作。就冠层截留研究方法而言,很多学者<sup>[78,80]</sup>借助遥感技术观测所得的 LAI、降水、蒸散发等多种高分辨率遥感数据进行截留水量计算。结合模型进行反演可以通过确定植被的生态参数提高测定精度,但相关遥感产品的开发和应用尚未完全成熟,还需进一步完善。

### 4.3 冠层截留模型与全球环境变化模型耦合可以增强模型的适用性

全球变化多项研究表明未来极端气候事件频率增加将会加速水文循环过程。冠层截留作为重要的水文环节也被纳入全球变化情景陆面模拟方案<sup>[81]</sup>。冠层截留对全球环境变化的响应及反馈不仅仅体现在全球陆面蒸散发及径流调节。已有研究证实不同的冠层截留方案的参数会改变全球陆气耦合模式的敏感性,且对气候的影响需要进一步探究<sup>[82]</sup>。考虑到目前关于全球环境变化的研究缺乏小尺度下的可靠数据和模型,全球气候模拟与 LUCC 模型尺度的不匹配会增加植被冠层截留区域性研究的难度<sup>[83]</sup>,这从侧面也反映出在全球环境变化的背景下结合不同区域的截留差异揭示植被冠层截留规律需要进一步扩大研究范围。

#### 参考文献(References):

- [1] 郭建平. 植物对降水截留的研究进展[J]. 应用气象学报, 2020, 31(6): 641-652. (GUO J P. Research progress of precipitation interception by plants[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2020, 31(6): 641-652. (in Chinese)) DOI: 10. 11898/j. issn. 1001-7313. 2020. 06. 01.
- [2] 韩雪, 王力, 王艳萍. 自然降雨条件下夏玉米冠层截留特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2014, 47(8): 1541-1549. (HAN X, WANG L, WANG Y P. Canopy interception of summer corn and its influencing factors under natural rainfall[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2014, 47(8): 1541-1549. (in Chinese)) DOI: 10. 3864/



- j. issn. 0578-1752. 2014. 08. 010.
- [3] 刘春蓁. 气候变化对陆地水循环影响研究的问题[J]. 地球科学进展, 2004, 19(1): 115-119. (LIU C Z. The issues in the impact study of climate change on the terrestrial hydrological cycle[J]. Progress in Earth Science, 2004, 19(1): 115-119. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2004. 01. 0115.
- [4] 王爱娟, 章文波. 林冠截留降雨研究综述[J]. 水土保持研究, 2009, 16(4): 55-59. (WANG A J, ZHANG W B. Review of vegetation interception of rainfall[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(4): 55-59. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STBY. 0. 2009-04-012.
- [5] 朱永杰, 毕华兴, 霍云梅, 等. 草冠截留影响因素及其测定方法对比研究综述[J]. 中国农学通报, 2014, 30(34): 117-122 (ZHU Y J, BI H X, HUO Y M, et al. Review of the influencing factors and their measurement methods[J]. China Agriculture Science Bulletin, 2014, 30(34): 117-122. (in Chinese)) DOI: 10. 11924/j. issn. 1000-6850. 2014-0841.
- [6] 杨全. 黄土丘陵区典型草地群落冠层降雨截留容量特征及其影响因素[D]. 北京: 中国科学院大学, 2020. (YANG Q. Characteristics of canopy rainfall interception capacity and its influencing factors of typical grassland community in loess hilly area[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020. (in Chinese)) DOI: <http://ir. iswc. ac. cn/handle/361005/9205>.
- [7] 徐丽宏, 时忠杰, 王彦辉, 等. 六盘山主要植被类型冠层截留特征[J]. 应用生态学报, 2010, 21(10): 2487-2493. (XU L H, SHI Z J, WANG Y H, et al. Canopy interception characteristics of main vegetation types in Liupan Mountains of China. [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(10): 2487-2493. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2010. 0387.
- [8] 范世香, 高雁, 程银才, 等. 林冠对降雨截留能力的研究[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 200-204. (FAN S X, GAO Y, CHENG Y C, et al. Rainfall-intercepting capability of forest canopy[J]. Scientia Geographica Sinica, 2007, 27(2): 200-204. (in Chinese)) DOI: 10. 13249/j. cnki. sgs. 2007. 02. 200.
- [9] 魏曦, 毕华兴, 梁文俊. 基于 Gash 模型对华北落叶松和油松人工林冠层截留的模拟[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 27-33. (WEI X, BI H X, LIANG W J. Canopy interception simulation of larix principis-ruprechtii and pinus tabulaeformis forests in northern China based on Gash model[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15(6): 27-33. (in Chinese)) DOI: 10. 16843/j. sswc. 2017. 06. 004.
- [10] 王彦辉, 于澎涛. 林冠截留降雨模型转化和参数规律的初步研究[J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(6): 29-34. (WANG Y H, YU P T. A preliminary study on transformation of rainfall interception models and parameter's variation[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1998, 20(6): 29-34. (in Chinese)) DOI: 10. 13332/j. 1000-1522. 1998. 06. 005.
- [11] 杨志鹏, 李小雁, 孙永亮, 等. 毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征[J]. 水科学进展, 2008, 19(5): 693-698. (YANG Z P, LI X Y, SUN Y L, et al. Characteristics of rainfall interception and stemflow for salix psammophila in Maowusu Sandland, northwest China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(5): 693-698. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2008. 05. 022.
- [12] 赵文玥, 吉喜斌. 干旱区稀疏树木冠层降雨截留蒸发的研究进展与展望[J]. 地球科学进展, 2021, 36(8): 862-879. (ZHAO W Y, JI X B. A review of research advances on future and perspectives of evaporation of intercepted rainfall from sparse tree canopy in drylands[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(8): 862-879. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2021. 001.
- [13] 万艳芳, 李广, 刘贤德, 等. 祁连山青海云杉林苔藓层降雨再分配特征及其影响因素[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1149-1156. (WAN Y F, LI G, LIU X D, et al. Rainfall partition in bryophyte layer in picea crassifolia forest and its affecting factors in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1149-1156. (in Chinese)) DOI: 10. 13866/j. azr. 2017. 05. 25.
- [14] 凡国华, 韩城, 孙永涛, 等. 长三角地区马尾松林降雨再分配特征[J]. 西南农业学报, 2019, 32(2): 422-428. (FAN G H, HAN C, SUN Y T, et al. Rainfall redistribution in pinus massoniana forest of Yangtze River Delta[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2019, 32(2): 422-428. (in Chinese)) DOI: 10. 16213/j. cnki. scjas. 2019. 2. 032.
- [15] 张平, 刘贤德, 张学龙, 等. 祁连山林草复合流域灌木林水文生态功能研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(5): 922-929. (ZHANG P, LIU X D, ZHANG X L, et al. Shrubbery eco-hydrological effect of forest-grass catchment of Qilian Mountains [J]. Arid Land Geography, 2013, 36(5): 922-929. (in Chinese)) DOI: 10. 13826/j. cnki. cn65-1103/x. 2013. 05. 019.
- [16] 崔启武, 边履刚, 史继德, 等. 林冠对降水的截留作用[J]. 林业科学, 1980, 16(2): 141-146. (CUI Q W, BIAN L G, SHI J D, et al. The interception effect of the forest crown on the precipitation[J]. Forest Science, 1980, 16(2): 141-146. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; LYKE. 0. 1980-02-010.
- [17] WEILER R. Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity[J]. Advances in Water



- Resources, 2006, 29(7): 974-986. DOI: 10. 1016/j. adv-watres. 2005. 07. 017.
- [18] 陈祖刚, 徐芝英, 胡云锋. 基于数码相机的草地植被盖度测量方法对比研究[J]. 草业学报, 2014, 23(6): 20-27. (CHEN Z G, XU Z Y, HU Y F. Measuring grassland vegetation cover using digital camera images[J]. Acta Prataculture Sinica, 2014, 23(6): 20-27. (in Chinese)) DOI: 10. 11686/cyxb20140603.
- [19] 章超斌, 李建龙, 张颖, 等. 基于 RGB 模式的一种草地盖度定量快速测定方法研究[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 220-226. (ZHANG C B, LI J L, ZHANG Y, et al. A quantitative analysis method for measuring grassland coverage based on RGB mode[J]. Acta Prataculture Sinica, 2013, 22(4): 220-226. (in Chinese)) DOI: 10. 11686/cyxb20130427.
- [20] 李永宁, 张宾兰, 秦淑英, 等. 郁闭度及其测定方法研究与应用[J]. 世界林业研究, 2008, 21(1): 40-46. (LI Y N, ZHANG B L, QIN S Y, et al. Review of research and application of forest canopy closure and its measuring methods[J]. World Forestry Research, 2008, 21(1): 40-46. (in Chinese)) DOI: 10. 13348/j. cnki. sj-lyyj. 2008. 01. 006.
- [21] 杨妍婷. 基于高分遥感数据的森林郁闭度估测方法研究[J]. 智能计算机与应用, 2019, 9(2): 67-72. (YANG Y T. Estimation method of forest canopy density based on high resolution remote sensing data[J]. Intelligent Computer and Applications, 2019, 9(2): 67-72. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DLXZ. 0. 2019-02-015.
- [22] 张瑞英, 庞勇, 李增元, 等. 结合机载 LiDAR 和 LANDSAT ETM+ 数据的温带森林郁闭度估测[J]. 植物生态学报, 2016, 40(2): 102-115. (ZHANG R Y, PANG Y, LI Z Y, et al. Canopy closure estimation in a temperate forest using airborne LiDAR and LANDSAT ETM+ data[J]. Journal of Plant Ecology, 2016, 40(2): 102-115. (in Chinese)) DOI: 10. 17521/cjpe. 2014. 0366.
- [23] 张亿博, 申健, 李浩宁, 等. 农作物叶面积指数测量方法[J]. 南方农业, 2019, 13(12): 139-141. (ZHANG Y B, SHEN J, LI H N, et al. Crop leaf area index measurement method[J]. South China Agriculture, 2019, 13(12): 139-141. (in Chinese)) DOI: 10. 19415/j. cnki. 1673-890x. 2019. 12. 073.
- [24] 盛后财, 蔡体久, 李奕, 等. 大兴安岭北部兴安落叶松林降雨截留再分配特征[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 5. (SHENG H C, CAI T J, LI Y, et al. Rainfall redistribution in larix gmelinii forest on northern of Daxing'an Mountains, northeast of China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 5. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbcbx. 2014. 06. 019.
- [25] 盛雪娇, 王曙光, 关德新, 等. 辽宁东部山区落叶松人工林林冠降雨截留观测及模拟[J]. 应用生态学报, 2010, 21(12): 3021-3028. (SHENG X J, WANG S G, GUAN D X, et al. Canopy interception in larch plantations: measurement and modeling in eastern Liaoning Mountainous Region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(12): 3021-3028. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2010. 0465.
- [26] 唐臻. 锐齿栎林林冠截留与大气降水关系[J]. 西北林学院学报, 1992, 7(4): 8-14. (TANG Z. Relationship between forest canopy interception and rainfall of sharp-tooth oak forest[J]. Journal of Northwestern Forest College, 1992, 7(4): 8-14. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; XBLX. 0. 1992-04-001.
- [27] 田风霞, 赵传燕, 冯兆东, 等. 祁连山青海云杉林冠生态水文效应及其影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 62-72. (TIAN F X, ZHAO C Y, FENG Z D, et al. Eco-hydrological effects of Qinghai spruce (Picea crassifolia) canopy and its influence factors in the Qilian Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 62-72. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201012261845.
- [28] 巩合德, 张一平, 刘玉洪, 等. 哀牢山常绿阔叶林林冠的截留特征[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(4): 469-474. (GONG H D, ZHANG Y P, LIU Y H, et al. Interception capability in an evergreen broad-leaved forest of Ailaoshan, Yunnan Province[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(4): 469-474. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZJLX. 0. 2008-04-018.
- [29] 任亮, 任树梅, 杨培岭, 等. 杏树林冠降水截留效应及其模拟研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(1): 183-187. (REN L, REN S M, YANG P L, et al. Canopy distribution of precipitation and simulation of apricot forests[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(1): 183-187. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; STBY. 0. 2010-01-039.
- [30] 周彬, 韩海荣, 康峰峰, 等. 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1645-1653. (ZHOU B, HAN H R, KANG F F, et al. Characteristics of precipitation distribution in pinus tabulaeformis plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1645-1653. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201206060818.
- [31] 马波, 耿晓晨, 马璠, 等. 模拟降雨条件下谷子和冬小麦植株对降雨再分配过程的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(6): 207-214. (MA B, GENG X C, MA F, et al. Effect of millet and winter wheat planting on the redistribution of rainfall under simulated rainfall conditions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2014, 32(6): 207-214. (in Chinese)) DOI: CNKI;

- SUN;GHDQ. 0. 2014-06-037.
- [32] 王迪,李久生,饶敏杰. 玉米冠层对喷灌水量再分配影响的田间试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(7): 43-47. (WANG D, LI J S, RAO M J. Sprinkler water distributions as affected by corn canopy[J]. Transactions of The CSAE, 2006, 22(7): 43-47. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;NYGU. 0. 2006-07-008.
- [33] 张光辉,梁一民. 黄土丘陵区沙打旺草地截留试验研究[J]. 水土保持通报, 1995, 15(3): 28-32. (ZHANG G H, LIANG Y M. A study on intercepting rainfall of astragalus adsurgens in loess hilly region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, 15(3): 28-32. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;STTB. 0. 1995-03-005.
- [34] 张莹,毛小青,胡夏嵩,等. 草本与灌木植物茎叶降水截留作用研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(7): 95-96. (ZHANG Y, MAO X Q, HU X S, et al. Study on precipitation interception of herbs and shrubs[J]. Yellow River, 2010, 32(7): 95-96. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-1379. 2010. 07. 041.
- [35] 王新平,康尔泗,张景光,等. 荒漠地区主要固沙灌木的降水截留特征[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 89-94. (WANG X P, KANG E S, ZHANG J G, et al. Comparison of interception loss in shrubby and sub-shrubby communities in the tengger desert of northwest China[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 89-94. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;BCDT. 0. 2004-01-013.
- [36] 成向荣,黄明斌,邵明安,等. 黄土高原农牧交错带人工乔灌木林冠截留[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7): 1213-1217. (CHENG X R, HUANG M B, SHAO M A, et al. Canopy interception of tree and shrub plantations in a farming-pastoral zone of loess plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, 28(7): 1213-1217. (in Chinese)) DOI: 10. 13292/j. 1000-4890. 2009. 0230.
- [37] 张金池,卢义山,康立新. 苏北海堤防护林冠层截留降水特性研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1996, 20(1): 17-21. (ZHANG J C, LU Y S, KANG L X. Study on the interceptional characteristic of main shelterforest canopies on seawall in Jiangsu Province[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science edition), 1996, 20(1): 17-21. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;NJLY. 0. 1996-01-004.
- [38] 李佳,饶良懿,鲁绍伟,等. 北京密云油松与刺槐林降雨再分配过程研究[J]. 广东农业科学, 2012, 39(12): 169-174. (LI J, RAO L Y, LU S W, et al. Pine and locust forest on rainfall redistribution in Miyun of Beijing[J]. Guangdong Agricultural Science, 2012, 39(12): 169-174. (in Chinese)) DOI: 10. 16768/j. issn. 1004-874x. 2012. 12. 061.
- [39] 党宏忠,周泽福,赵雨森. 青海云杉林冠截留特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 60-64. (DANG H Z, ZHOU Z F, ZHAO Y S. Study on forest interception of picea crassifolia[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 60-64. (in Chinese)) DOI: 10. 13870/j. cnki. stbxb. 2005. 04. 015.
- [40] 董世仁,郭景. 华北油松人工林的透流、干流和树冠截留[J]. 北京林业大学学报, 1987, 9(1): 58-68. (DONG S R, GUO J. Transflow, trunk and canopy interception of north China oilpine plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 1987, 9(1): 58-68. (in Chinese)) DOI: 10. 13332/j. 1000-1522. 1987. 01. 006.
- [41] 杜尧东,王建,刘作新,等. 春小麦田喷灌的水量分布及小气候效应[J]. 应用生态学报, 2001, 12(3): 398-400. (DU Y D, WANG J, LIU Z X, et al. Water distribution and microclimatic effects of sprinkler irrigation on spring wheat field[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(3): 398-400. (in Chinese)) DOI: 10. 13287/j. 1001-9332. 2001. 0094.
- [42] 余长洪,李就好,陈凯,等. 甘蔗冠层对降雨再分配的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 85-87. (YU C H, LI J H, CHEN K, et al. Effects of sugarcane canopy on rainfall redistribution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(3): 85-87. (in Chinese)) DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2015. 03. 021.
- [43] 徐宁,杨一凡,林青涛,等. 大豆冠层对降雨再分配的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(2): 115-119. (XU N, YANG Y F, LIN Q T, et al. Effects of soybean canopy on rainfall redistribution[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(2): 115-119. (in Chinese)) DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2020. 02. 016.
- [44] 邓慧平. 气温变化对西南山区流域森林水文效应影响的模拟[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 601-605. (DENG H P. Modeling the impacts of temperature changes on hydrological effects of forests in the mountain region of southwestern China at basin scale[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2012, 21(4): 601-605. (in Chinese)) DOI: 10. 16258/j. cnki. 1674-5906. 2012. 04. 009.
- [45] 熊壮. 元江干热河谷稀树灌丛冠层降雨再分配及降雨分量的化学特征[D]. 昆明: 西南林业大学, 2019. (XIONG Z. Characteristics of eco-hydrology in meadow grassland with different grazing systems[D]. Kunming: Southwest Forestry University, 2019. (in Chinese)) DOI: 10. 27416/d. cnki. gxnlc. 2019. 000032.
- [46] 卓丽,苏德荣,刘自学,等. 草坪型结缕草冠层截留性能试验研究[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 669-675. (ZHUO L, SU D R, LIU Z X, et al. Capability of canopy interception of turfgrass (zoysia sinica hance)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 669-675. (in Chinese))

- DOI:10.3321/j.issn:1000-0933.2009.02.015.
- [47] 赵伟霞,张萌,李久生,等.基于简易吸水法的喷灌施肥冬小麦冠层截留量[J].水利学报,2020,51(3):335-341.(ZHAO W X,ZHANG M,LI J S,et al.Canopy interception of winter wheat under sprinkler fertigation based on wet-absorption method[J].Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(3):335-341.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.20190912.
- [48] 刘战东,高阳,巩文军,等.冬小麦冠层降水截留性能研究[J].麦类作物学报,2012,32(4):678-682.(LIU Z D,GAO Y,GONG W J,et al.Experimental study on capability of canopy interception of rainfall in winter wheat[J].Journal of Triticeae Crop,2012,32(4):678-682.(in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;MLZW.0.2012-04-015.
- [49] 武秀荣,金铭,赵维俊,等.运用 Gash 修正模型对祁连山北麓中段青海云杉林降水截留的模拟[J].水土保持学报,2020,34(5):216-222.(WU X R,JIN M,ZHAO W J,et al.Application of modified gash model to simulate rainfall interception of picea crassifolia forest in the middle of the northern Qilian Mountain[J].Journal of Soil and Water Conservation,2020,34(5):216-222.(in Chinese)) DOI:10.13870/j.cnki.stb-xxb.2020.05.030.
- [50] 曹群根.毛竹林冠层对降水的截留作用[J].福建林学院学报,1991,11(1):37-43.(CAO Q G.Pretraction of canopy of bamboo forest[J].Journal of Fujian College of Forestry,1991,11(1):37-43.(in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;FJLB.0.1991-01-006.
- [51] HORTON R E.Rainfall interception[J].Monthly Weather Review,1919,47(9):603-623.DOI:https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<603:RI>2.0.CO;2.
- [52] GASH J H,LLOYD C,LACHAUD G.Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model[J].Journal of Hydrology,1995,170(1-4):79-86.DOI:/10.1016/0022-1694(95)02697.
- [53] 高婵婵,彭焕华,赵传燕,等.基于 Gash 模型的青海云杉林降水截留模拟[J].生态学报,2015,34(1):288-294.(GAO C C,PENG H H,ZHAO C Y,et al.Simulation of rainfall interception of Qinghai spruce (picea crassifolia) forest in the eastern part of Qilian Mountains by Gash model[J].Chinese Journal of Ecology,2015,34(1):288-294.(in Chinese)) DOI:10.13292/j.1000-4890.2015.0040.
- [54] 王馨,张一平,刘文杰.Gash 模型在热带季节雨林林冠截留研究中的应用[J].生态学报,2006,26(3):722-729.(WANG X,ZHANG Y P,LIU W J.Modeling canopyrainfall interception of a tropical seasonal rainforest in Xishuangbanna, Southwest China [J].Acta Ecologica Sinica,2006,26(3):722-729.(in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;STXB.0.2006-03-011.
- [55] 刘家冈.林冠对降雨的截留过程[J].北京林业大学学报,1987,9(2):140-144.(LIU J G.Interception progress of rainfall in forest canopy[J].Journal of Beijing Forestry University,1987,9(2):140-144.(in Chinese)) DOI:10.13332/j.1000-1522.1987.02.003.
- [56] 裴铁璠,郑远长.林冠分配降雨过程模拟与模型 I:常雨强下穿透降雨、树干径流和林冠截留模型[J].林业科学,1996,32(1):1-10.(PEI T F,ZHENG Y C.The simulation and model of rainfall process distribution in forest canopy I:The model of throughfall, stemflow and canopy interception under constant rainfall intensity[J].Scientia Silvae Sinicae,1996,32(1):1-10.(in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;LYKE.0.1996-01-000.
- [57] MURRAY V,EBI K L.IPCC special report on managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation (SREX)[J].Journal of Epidemiology and Community Health,2012,66(9):759-760.DOI:10.1136/jech-2012-201045.
- [58] 翟盘茂,潘晓华.中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J].地理学报,2003,58(S1):1-10.(ZHAI P M,PAN X H.Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century[J].Acta Geographica Sinica,2003,58(S1):1-10.(in Chinese)) DOI:10.11821/xb20037s001.
- [59] TABARI H.Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability [J].Scientific Reports,2020,10(1):1-10.DOI:https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2.
- [60] 宋晓猛,张建云,占车生,等.气候变化和人类活动对水文循环影响研究进展[J].水利学报,2013,44(7):779-790.(SONG X M,ZHANG J Y,ZHAN C S,et al.Review for impacts of climate change and human activities on water cycle[J].Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(7):779-790.(in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2013.07.001.
- [61] LYU A F,QU B,JIA S F,et al.Influence of three phases of El Niño-Southern Oscillation on daily precipitation regimes in China[J].Hydrology and Earth System Sciences,2019,23(2):883-896.DOI:https://doi.org/10.5194/hess-23-883-2019.
- [62] QU B,LYU A F,JIA S F,et al.Daily precipitation changes over large river basins in China,1960-2013[J].Water,2016,8(5):185.DOI:10.3390/w8050185.
- [63] 吴艳宏,周俊.山地环境与全球变化研究的进展与展望[J].第四纪研究,2011,31(5):909-916.(WU Y H,ZHOU J.Progress and prospect of research on mountain environment and global change [J].Quaternary Sciences,2011,31(5):909-916.(in Chinese)) DOI:

10. 3969/j. issn. 100-7410. 2011. 05. 16.
- [64] 崔胜辉,李旋旗,李扬,等. 全球变化背景下的适应性研究综述[J]. 地理科学进展, 2011, 30(9): 1088-1098. (CUI S H, LI X Q, LI Y, et al. Review on adaptation in the perspective of global change[J]. *Process in Geography*, 2011, 30(9): 1088-1098. (in Chinese)) DOI: <http://www. progressingeography. com/CN/Y2011/V30/I9/1088>.
- [65] 郑景云,葛全胜,赵会霞. 近 40 年中国植物物候对气候变化的响应研究[J]. 中国农业气象, 2003, 24(1): 29-33. (ZHENG J Y, GE Q S, ZHAO H X. Changes of plant phenological period and its response to climate change for the last 40 years in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(1): 29-33. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; ZGNY. 0. 2003-01-008.
- [66] KJELL H, HANS T, STEIN K. Trends in the start of the growing season in Fennoscandia 1982-2011[J]. *Remote Sensing*, 2013, 5(9): 4304-4318. DOI: 10. 3390/rs5094304.
- [67] JEONG S J, HO C H, GIM H J, et al. Phenology shifts at start vs. end of growing season in temperate vegetation over the northern Hemisphere for the period 1982 - 2008[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(7): 2385-2399. DOI: 10. 1111/j. 1365-2486. 2011. 02397. x
- [68] RICHARDSON A D, BAILEY A S, DENNY E G, et al. Phenology of a northern hardwood forest canopy[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(7): 1174-1188. DOI: 10. 1111/j. 1365-2486. 2006. 01164. x
- [69] LYU A F, ZHOU L. A rainfall model based on a geographically weighted regression algorithm for rainfall estimations over the arid Qaidam basin in China[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(4): 311. DOI: 10. 3390/rs8040311.
- [70] 朴世龙,方精云. 1982—1999 年我国陆地植被活动对气候变化响应的季节差异[J]. 地理学报, 2003, 58(1): 119-125. (PIAO S L, FANG J Y. Seasonal changes in vegetation activity in response to climate changes in China between 1982 and 1999[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(1): 119-125. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DLXB. 0. 2003-01-014.
- [71] 刘国华,傅伯杰. 全球气候变化对森林生态系统的影响[J]. 自然资源学报, 2001, 16(1): 71-78. (LIU G H, FU B J. Effects of global climate change on forest ecosystems[J]. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(1): 71-78. (in Chinese)) DOI: 10. 11849/zrzyxb. 2001. 01. 012.
- [72] 赵茂盛,延晓冬,董文杰. 气候变化对中国植被可能影响的模拟[J]. 地理学报, 2002, 57(1): 28-38. (ZHAO M S, YAN X D, DONG W J. Modeling the vegetation of China under changing climate[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(1): 28-38. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; DLXB. 0. 2002-01-003.
- [73] 郭旭东,陈利顶,傅伯杰. 土地利用/土地覆被变化对区域生态环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(6): 66-75. (GUO X D, CHEN L D, FU B J. Effects of land use/land cover changes on regional ecological environment[J]. *Advances in Environmental Science*, 1999, 7(6): 66-75. (in Chinese)) DOI: CNKI; SUN; HJJZ. 0. 1999-06-008.
- [74] 范月君,畅喜云,赵得萍,等. 放牧干扰对三江源区高山嵩草甸植被冠层降雨截留容量的影响[J]. 贵州农业科学, 2020, 48(6): 81-84. (FAN Y J, CHANG X Y, ZHAO D P, et al. Effects of grazing disturbing on rainfall interception capacity of plant canopy in kobresia pygmaea meadow of Three-River-Source Regions[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2020, 48(6): 81-84. (in Chinese)) DOI: <http://210. 75. 249. 4/handle/363003/60562>.
- [75] 李晓兵,陈云浩,张云霞,等. 气候变化对中国北方荒漠草原植被的影响[J]. 地球科学进展, 2002, 17(2): 254-261. (LI X B, CHEN Y H, ZHANG Y X, et al. Impact of climate change on desert steppe in northern China[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 17(2): 254-261. (in Chinese)) DOI: 10. 11867/j. issn. 1001-8166. 2002. 02. 0254.
- [76] 张鹤,陈吉,熊沛枫,等. 黄土丘陵区 3 种典型天然草地群落土壤呼吸对模拟降雨的响应[J]. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3139-3148. (ZHANG H, CHEN J, XIONG P F, et al. Soil respiration response to simulated rainfall pulses in natural grassland communities in Loess Hilly-gully Region[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(8): 3139-3148. (in Chinese)) DOI: 10. 13671/j. hjkxxb. 2017. 0011.
- [77] 张润,刘志辉,姚俊强,等. 干旱区绿洲城市草坪草截留特征研究[J]. 北方园艺, 2016(5): 69-72. (ZHANG R, LIU Z H, YAO J Q, et al. Study on rainfall interception characteristic of turfgrass in Arid Oasis City[J]. *Northern Horticulture*, 2016(5): 69-72. (in Chinese)) DOI: 10. 11937/bfyy. 201605020.
- [78] 孙彩红,苏泳娴,韩留生,等. 广东省 2004—2016 年植被冠层降雨截留模拟及时空变化特征[J]. 生态学报, 2020, 40(7): 2252-2266. (SUN C H, SU Y X, HAN L S, et al. The simulation and spatial-temporal variations of atmospheric rainfall interception by vegetation canopies based on MODIS LAI data at the basin scale in the Guangdong Province from 2004 to 2016[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(7): 2252-2266. (in Chinese)) DOI: 10. 5846/stxb201811162481.
- [79] 吴丹,邵全琴,刘纪远. 江西泰和县森林生态系统水源涵养功能评估[J]. 地理科学进展, 2012, 31(3): 330-

336. (WU D, SHAO Q Q, LIU J Y. Assessment of water conservation function of forest ecosystem in Taihe County, Jiangxi Province[J]. *Process In Geography*, 2012, 31 (3): 330-336. (in Chinese)) DOI: 2012,31(3);330-336.
- [80] 白雲, 苏德, 李新通, 等. 井冈山国家级自然保护区林冠降雨截留模拟研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(S1): 70-77. (BAI Y, SU D, LI X T, et al. Study of simulating forest canopy rainfall interception at the Jinggangshan national nature reserve, China [J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2015, 24 (S1): 70-77. (in Chinese)) DOI: 0. 11870/cjlizyjhj2015Z10010.
- [81] DAVIES-BARNARD T, VALDES P J, JONES C D, et al. Sensitivity of a coupled climate model to canopy interception capacity[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 42 (7/8): 1715-1732. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2100-1>.
- [82] 陈海山, 穆梦圆, 尹伊, 等. CLM4. 5 冠层截留方案的敏感性试验与改进[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(3): 334-347. (CHEN H S, MU M Y, YIN Y, et al. Sensitivity study and improvement of canopy interception scheme in CLM4. 5[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(3): 334-347. (in Chinese)) DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180313001.
- [83] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. *生态环境学*, 2014, 23 (12): 2013-2021. (ZHANG X R, LIU L P, FANG S, et al. Research advances on the relationship between land use/cover change and environmental change[J]. *Ecology and Environmental Science*, 2014, 23 (12): 2013-2021. (in Chinese)) DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2014.12.018.

### Research progress of vegetation canopy interception in China

LYU Aifeng<sup>1,2</sup>, WANG Lei<sup>1,2</sup>, QU Bo<sup>3</sup>

(1. *Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China*; 2. *University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China*; 3. *University of Montreal, Montreal, H3T 1J4, Canada*)

**Abstract:** The quantity and spatial distribution of precipitation are changed by the interception of vegetation canopy, and then affect the water cycle of ecosystem. Evaluated canopy interception and its temporal and spatial dynamic changes accurately is of great significance for exploring the process of eco-hydrological cycle and revealing the impact of climate change.

Abundant literature analysis is used to deepen the understanding of the interception mechanism. Precipitation characteristics, vegetation physiological characteristics, and meteorological factors affect the canopy interception process. With the continuous precipitation, the canopy interception rate first increased and then decreased. The continuous expansion of vegetation leaf area is conducive to precipitation interception. Wind speed, air temperature, canopy dryness, and other factors can increase additional interception. Precipitation is intercepted variously among different vegetation types. The canopy interception rate of trees is about 30% and that of crops is only about 15%. Precipitation variability is increasing, and the phenological effect of vegetation and land use are also changing, which will deeply affect all links of the water cycle, and then affect the interception of the vegetation canopy. Artificial simulation and indirect observation are used to determine the interception water volume. The artificial simulation method is used to determine the interception water of a few low herbs, shrubs, and crops, and the measurement results are often greater than the actual direct observation. The estimation of interception through the water balance equation is called the indirect observation method, which can well obtain the dynamic change of precipitation interception. The canopy interception model combined with the results of indirect observation can simulate a wider range of canopy interception water. Three canopy interception models have been studied in China. Canopy interception mechanism is one of the emphases of theoretical models, and it requires higher mathematical computing power for researchers. The semi-empirical semi-theoretical model is widely applied because of its fewer parameters and relatively clear physical meaning.

Based on the above contents, the research on canopy interception is discussed and prospected: (1) Herbaceous plants play an important role in ecological maintenance and green city construction in arid and plateau areas, so they should be paid more attention; Different canopy interception measurement methods and problems existing in the operation process will lead to great uncertainty in the measured results, and the measurement method can be improved in combination with global scale remote sensing data; The canopy interception model can be coupled with the global environmental change model to enhance the applicability of the model.

**Key words:** canopy interception; influencing factor; canopy interception model; global change; review