

晋西山杨和油松生物量分配格局及异速生长模型研究

王宁^{1,2}, 王百田¹, 王瑞君¹, 曹晓阳¹, 王文静¹, 迟璐¹

(1. 北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083; 2. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 山杨和油松是晋西地区重要的建群树种, 采用整株收获法分析了山杨和油松各器官生物量以及地上地下生物量分配格局。采用胸径(DBH)、树高(H)、树木因子(D^2H)、平均冠幅(CW)和冠长(CL)等变量建立了叶、枝、干、根、地上部分及整株生物量模型, 并选取了最优模型。结果表明: (1) 山杨的叶、枝、干、根生物量分配比例分别为 3.42%, 11.23%, 64.30% 和 21.06%, 油松的叶、枝、干、根生物量分配比例分别为 13.44%, 19.86%, 47.52% 和 19.18%; 山杨和油松地上生物量和地下生物量比值分别为 3.32 : 1 和 3.99 : 1。(2) 山杨和油松的地上生物量与地下生物量之间呈极显著线性相关($p < 0.001$)。(3) 山杨和油松各器官生物量拟合的最优模型形式均为 CAR 类型, 模型解释量均超过 92%。(4) 基于树木胸径 D 的山杨和油松各器官单变量模型可解释量除叶(解释量 $> 83\%$)外均达到或超过了 90%, 树高不宜单独对各器官生物量进行预测。综合考虑模型的可解释量和生产实践中的需要, 胸径是预测山杨和油松不同器官生物量的可靠变量。

关键词: 生物量分配; 异速生长模型; 山杨; 油松

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)02-0151-05

中图分类号: S758

Biomass Allocation Patterns and Allometric Models of *Populus Davidiana* and *Pinus Tabulaeformis* Carr. in West of Shanxi Province

WANG Ning^{1,2}, WANG Bai-tian¹, WANG Rui-jun¹, CAO Xiao-yang¹, WANG Wen-jing¹, CHI Lu¹

(1. School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. College of Agronomy, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China)

Abstract: *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr. are two important tree species in western Shanxi Province. Biomass of each component and above and below-ground biomass of *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr. were obtained by harvesting 40 trees with various diameters at breast height(DBH), and furthermore, their allocation patterns were analyzed. Allometric models for each component (leaves, branch, stem, root, aboveground and the whole tree) of *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr. were then developed based on independent variables including DBH, tree height(H), trees factor(D^2H), average crown width (CW), and crown length(CL), and the best fitting models were identified. The results showed that relative proportions of leaves, branch, stem and root to the total tree biomass were 3.42%, 11.23%, 64.30% and 21.06% for *Populus davidiana*, and 13.44%, 19.86%, 47.52% and 19.18% for *Pinus tabulaeformis* Carr., respectively. The ratio of aboveground biomass and belowground biomass were 3.32 : 1 and 3.99 : 1 for *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr., respectively. The two variables were correlated linearly for both *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr. ($p < 0.001$). The best fitting models of two species were CAR models. The allometric models explained more than 92% of the variance in the data, biomass allometric models based on DBH explained more than 90%, while leaves biomass allometric model explained more than 83%. Tree height should not be used alone to predict the biomass of each component. Considering the variance explainability and the practical need, it can be concluded that DBH is a reliable predictor for estimating the biomass of each component for both *Populus davidiana* and *Pinus tabulaeformis* Carr..

Keywords: biomass allocation patterns; allometric models; *Populus davidiana*; *Pinus tabulaeformis* Carr.

收稿日期: 2012-04-20

修回日期: 2012-06-07

资助项目: 中科院战略先导专项专题“暖温带落叶阔叶混交林区域山西中部森林固碳现状、速率和潜力研究”(XDAO5050203-04-01)

作者简介: 王宁(1977—), 男(汉族), 陕西省合阳县人, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为生态环境工程。E-mail: soilandwater@163.com。

通信作者: 王百田(1958—), 男(汉族), 陕西省富平县人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态环境工程、林业生态工程和水土保持方面的研究。E-mail: wbaitian@bjfu.edu.cn。

随着全球大气 CO₂ 浓度升高及其带来的全球气候变化问题的日益加剧,已经引起人们对碳储量和碳平衡的广泛关注^[1]。森林作为陆地生态系统最重要的碳库,其生物量约占全球陆地植被生物量的 90% 以上^[2],占整个陆地生态系统地上碳库的 80%^[3]和地下碳库的 40%^[4]。当前气候变化条件下了解陆地生态系统碳储量和碳循环的有关情况,掌握生物量的分配特征和准确估测,有助于了解森林碳储量和碳平衡的动态变化。测定生物量的方法主要通过直接测量(direct measurement)和间接估测(indirect estimation)两种途径^[5]。直接测量方法虽准确但费时费力且对生态破坏较大^[6];而间接估测方法即生物量异速生长模型,其将简单易得的预测变量和树木生物量相结合,可间接估测森林生物量^[7]。晋西应用异速生长模型预测油松地上部分生物量的研究很多^[8-10],但对山杨和油松地下部分生物量异速生长模型研究还未见报道。本研究通过整株收获法研究了晋西山杨和油松各器官生物量分配规律以及地上地下生物量分配规律并建立了各器官生物量异速生长模型,旨在为该区域森林生物量及碳储量估算提供有效的研究方法。

1 研究区概况

方山县位于山西省西部,吕梁山中段西侧,介于东经 111° 02' 50"—111° 25' 30",北纬 37° 36' 58"—38° 10' 27",南北长 62 km,东西宽 46 km,总面积 1 434.1 km²。属暖温带半干旱大陆性区,该县年均气温 7.3 °C,≥10 °C 积温为 2 200~3 100 °C,年降水量 440~650 mm,无霜期由南到北逐步递减,最南的

大武镇达 150 d 以上,最北的开府乡只有约 90 d,平均风速 2.6 级,风向以东风为主。该县地势北高南低,地形分为山地、丘陵和谷地。最高点为孝文山主峰,海拔 2 831 m,最低点为大武镇武回庄河滩,海拔 986.7 m。境内主要土壤类型有亚高山草甸土,棕色森林土、淋溶褐土、草灌褐土和粗骨性褐土。植被属于温带暖温带落叶阔叶林带,森林覆盖率 32.6%。

2 材料与方法

2.1 研究材料

2011 年 7 月 15 日至 7 月 30 日在山西省方山县境内共选择不同胸径(diameter at breast height, DBH)的山杨(*Populus davidiana*)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)各 20 株,进行整株全收获,山杨和油松基本特征详见表 1。

2.2 研究方法

测量对象木胸径和南北向及东西向冠幅,树干上标出南北方向,记录相关信息;距离地表 5 cm 处用油锯将其伐倒,测量树木总长(从树基部到树冠顶端)和树冠长度;将树枝分离成叶和枝条,分别称鲜重;对于树干生物量较大,采用先分段再逐个称重,累加得树干总鲜重;根系采用全挖法,取出对象木的所有根系,清除非根物质后称鲜重^[11];最后对单株对象木各器官分别取鲜样(400~500 g)称重后带回实验室烘干,称重,根据各样本的含水率推算单株对象木各器官干重。在每株对象木基部分别截取 3 cm 厚圆盘并带回实验室利用 Lintab 5 年轮分析仪定年。山杨和油松整株生物量、地上生物量、地下生物量及根冠比大小范围详见表 2。

表 1 对象木基本特征

树种	株数/株	胸径/cm	树高/m	年龄/a	树冠长度/m	南北向冠幅/m	东西向冠幅/m
山杨	20	5.8~35	6.3~22.1	11~48	2.5~12.9	1.5~7.8	1.5~5.5
油松	20	5.5~33	4.6~18.3	18~40	3.1~13.7	2.0~6.8	2.0~6.9

表 2 对象木生物量特征

树种	株数/株	整株生物量/kg	地上生物量/kg	地下生物量/kg	根冠比/%
山杨	20	8.28~563.49	7.19~414.12	0.46~149.37	5.95~36.07
油松	20	5.04~488.43	4.06~392.13	0.98~96.29	17.56~32.20

2.3 模型结构设计

能够表达林木易测因子与生物量之间相关关系的模型应用最多的是非线性模型,尤其是相对生长模型 $Y = aX^b$ (constant allometric ratio, CAR) 和相对生长率可变模型 $Y = aX^b e^{cX}$ (variable allometric ratio, VAR)^[12]。这两类模型被许多林学家和生态

学家用来估计林木各器官生物量和单木总生物量^[13]。以 CAR 和 VAR 模型为基本结构,以胸径(D)、树高(H)和树木因子(D^2H)作为自变量^[8-9,13],各器官生物量为因变量,分别构造山杨和油松单木各器官生物量模型,因树冠特征变量对枝、叶生物量预测非常重要,所以在对山杨和油松的叶和枝生物量模

型构建中引入平均冠幅(CW)与冠长(CL)两个自变量,其模型形式详见表 3。

表 3 生物量模型形式

模型编号	模型形式	模型类型
1	$W = aD^b$	CAR
2	$W = aH^b$	CAR
3	$W = a(D^2 H)^b$	CAR
4	$W = a + bD$	CAR
5	$W = a + b(D^2 H)$	CAR
6	$W = a + bD + cD^2$	CAR
7	$W = a + b(D^2 H) + c(D^2 H)^2$	CAR
8	$W = aD^b H^c$	CAR
9	$W = aD^b e^{cD}$	VAR
10	$W = aH^b e^{cH}$	VAR
11	$W = aCW^b CL^c$	CAR
12	$W = aD^b CW^c$	CAR
13	$W = aD^b CL^c$	CAR

注:W 树木各部分生物量干重(kg); D 胸径(cm); H 树高(m); CW 平均冠幅(m); CL 冠长(m)。

选取最优拟合模型时,以综合考虑选择调整决定系数 R_{adj}^2 最大, RSS 值最小, F 值最大,模型各参数 t 检验显著和平均预测误差 MPE(mean prediction error, %)最小为原则^[14]。平均预测误差 MPE 计算公式为:

$$MPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i - \hat{Y}_i| / Y_i$$

数据处理采用 Excel 和 SPSS 18.0 软件进行分析。

3 结果与分析

3.1 生物量分配格局

山杨和油松不同器官生物量相对分配比例如图 1 所示。

由图 1 可以看出,山杨和油松的生物量都主要集中在干上,分别占整株生物量的(64.3±5.26)%和(47.52±5.53)%;山杨叶、枝生物量占的比例均小于油松叶、枝的生物量比例,且山杨叶枝总生物量比例仅为(14.65±5.67)%,油松叶枝总生物量比例为(33.3±6.81)%,山杨和油松地上生物量所占比例都接近 80%。从整株水平来看,山杨生物量分配表现为:干>根>枝>叶,油松生物量分配则表现为:干>枝>根>叶,山杨根冠比为(27.15±7.64)%,油松根冠比为(23.86±4.27)%。经 Wilcoxon 非参数检验,山杨各器官之间生物量分配比例差异极显著($p < 0.001$),油松各器官之间除枝与根生物量分配比例差异不显著($p > 0.05$)外,其余差异均极显著($p < 0.001$)。

山杨和油松地上生物量与地下生物量之间的

Person 相关系数高达 0.993 和 0.996,判定系数分别为 0.986 和 0.992($p < 0.001$),二者呈极显著线性相关且拟合方程的斜率分别为 0.362 和 0.249。

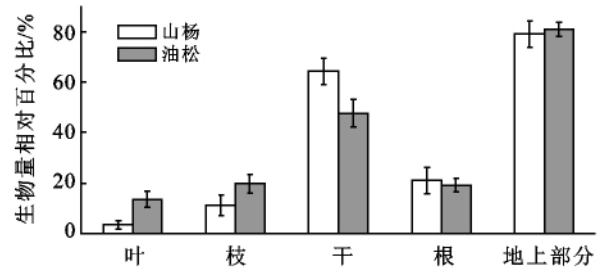


图 1 对象木不同器官生物量相对分配比例

从图 2 可以看出,山杨在不同径级时的各器官的生物量分配比例均表现为:干>根>枝>叶,叶和枝的生物量占整株生物量的 12.96%~17.16%,地上部分生物量占整株生物量的 73.49%~80.94%,叶、干、地上部分生物量的相对分配比例随径级增加呈下降趋势,其中叶、干、地上部分的下降斜率分别为 -0.942($r = -0.975$), -5.828($r = -0.991$)和 -3.724($r = -0.977$),枝和根的生物量分配比例则随径级增加呈上升趋势,其中枝、根的上升斜率为 3.046($r = 0.998$), 3.724($r = 0.977$)。而油松在 1 cm ≤ DBH < 20 cm 的径级范围内的各器官的生物量分配比例为:干>枝>根>叶,叶和枝的生物量占整株生物量的 34.41%~35.35%,地上部分生物量占整株生物量的 80.83%~81.39%,而 DBH ≥ 20 cm 的各器官的生物量分配比例则为:干>根>枝>叶,叶和枝的生物量占整株生物量的 25.15%,地上部分生物量占整株生物量的 79.70%,叶、地上部分生物量的相对分配比例随径级增加而呈下降趋势,其中叶、地上部分的下降斜率为 -2.689($r = -0.958$), -0.844($r = -0.982$),干和根的生物量分配比例则随径级增加呈上升趋势,其中干、根的上升斜率为 4.255($r = 0.855$), 0.844($r = 0.982$),枝的生物量分配比例表现为随径级先上升而后下降的趋势。

由图 3 可以看出,山杨在不同龄级时的各器官的生物量分配比例也均表现为:干>根>枝>叶,叶和枝的生物量占整株生物量的 12.80%~17.03%,地上部分生物量占整株生物量的 75.73%~82.02%,叶、干、地上部分生物量的分配比例表现为随龄级先下降后上升再下降的趋势,根则表现为先上升后下降再上升的趋势,只有枝表现为随龄级上升的趋势,上升斜率为 1.218($r = 0.868$)。油松各器官的生物量分配比例在 10 a ≤ AGE < 30 a 表现为:干>枝>根>

叶,叶和枝的生物量占整株生物量的 34.90%~36.46%,地上部分生物量占整株生物量的 80.88%~80.99%,而在 AGE≥30 a 表现为:干>根>枝>叶。叶和枝的生物量占整株生物量的 19.87%~30.58%。地上部分生物量占整株生物量的 80.28%~80.70%。叶、枝、地上部分生物量的分配比例表现为随龄级下降的趋势,下降的斜率分别为 -2.363($r=-0.935$), -3.046($r=-0.933$), -0.230($r=-0.955$),干、根则表现为随龄级上升的趋势,上升斜率分别为 5.178($r=0.932$)和 0.230($r=0.955$)。

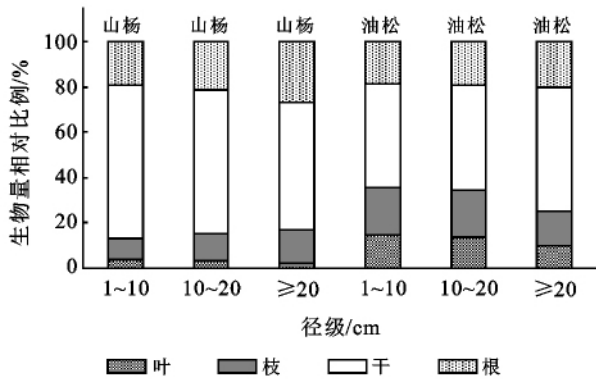


图 2 对象木不同径级各器官生物量相对分配比例

3.2 生物量异速生长模型

按照表 3 所列模型形式及模型选取原则,对山杨和油松单木各器官生物量进行模型拟合,并选出山杨和油松单木各器官的生物量得最优模型,其参数拟合

值,评价指标等参见表 4(限于篇幅,仅列出山杨和油松各器官生物量异速生长的最优模型)。

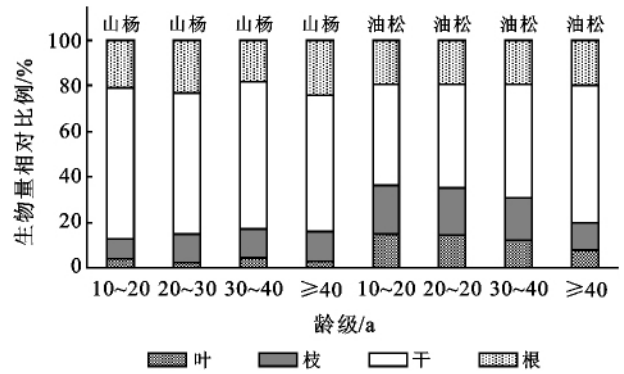


图 3 对象木不同龄级各器官生物量相对分配比例

山杨和油松各器官生物量拟合的最优模型形式均为 CAR 类型(表 4),山杨叶生物量最优模型形式为: $W = aD^bH^c$,干生物量最优模型形式为: $W = a + bD + cD^2$,根生物量最优模型形式为 $W = a + b(D^2H)$,枝、地上部分、整株生物量最优模型形式均为 $W = aD^b$,模型解释量为 92.1%~99.4%,平均预测误差 MPE 为 11.67%~47.91%;油松叶、枝生物量最优模型形式为: $W = aD^bCL^c$,干、根、地上部分、整株生物量最优模型形式均为: $W = a + b(D^2H)$,模型解释量为 95.8%~97.3%,平均预测误差 MPE 为 21.37%~32.56%。所有模型均通过 F 检验($p < 0.001$)和 t 检验($p < 0.001$)。

表 4 山杨和油松各器官生物量异速生长最优模型

树种	器官	模型	指标				
			R_{adj}^2	RSS	F 值	t 检验	MPE/%
山杨	叶	$W = 0.079D^{2.960}H^{-1.788}$	0.931	7.483	169.152	$p < 0.001$	47.91
	枝	$W = 0.004D^{2.846}$	0.922	2.101	224.894	$p < 0.001$	25.12
	干	$W = 6.290 - 2.133D + 0.315D^2$	0.994	437.436	1630.942	$p < 0.001$	12.23
	根	$W = 0.003(D^2H)^{1.071}$	0.921	2.154	221.206	$p < 0.001$	25.84
	地上	$W = 0.077D^{2.423}$	0.970	0.564	607.816	$p < 0.001$	13.48
	整株	$W = 0.085D^{2.480}$	0.974	0.503	713.187	$p < 0.001$	11.67
油松	叶	$W = 0.045D^{1.272}CL^{0.857}$	0.964	36.759	318.260	$p < 0.001$	22.97
	枝	$W = 0.073D^{0.956}CL^{1.281}$	0.963	99.840	302.244	$p < 0.001$	27.46
	干	$W = -0.662 + 0.014(D^2H)$	0.973	1940.962	696.183	$p < 0.001$	24.86
	根	$W = 1.608 + 0.005(D^2H)$	0.958	331.119	435.054	$p < 0.001$	32.56
	地上	$W = 5.991 + 0.019(D^2H)$	0.973	3422.082	683.792	$p < 0.001$	21.37
	整株	$W = 7.599 + 0.024(D^2H)$	0.971	5677.520	642.046	$p < 0.001$	22.46

4 讨论

(1) 植株不同器官的生物量分配是不均匀的,通常地下生物量占 21%,而地上生物量高达 79%^[15],

与本研究得出的山杨的地下和地上生物量分配比例完全一致,和油松的分配比例也基本一致。前人研究^[16]树干生物量占全株生物量的比例范围在 25%~76%,本研究得出的山杨的树干生物量比例为(64.30

±5.26)%，油松的树干生物量比例为(47.52±5.53)%，与之相一致。魏艳敏^[17]研究人工杨树林生物量得出的各器官生物量分配比例为：干>根>枝>叶，邱扬、彭孝飞、金钟跃等^[8,10]研究针叶林地上部分生物量得出的各器官生物量分配比例基本均表现为：干>枝>叶，本研究得出山杨各器官生物量分配比例为：干>根>枝>叶，而油松在 DBH≥20 cm, AGE≥30 a 时各器官生物量的分配比例为：干>根>枝>叶，而在 1 cm≤DBH<20 cm, 10 a≤AGE<30 a 则表现为：干>枝>根>叶。本研究还推算出山杨和油松地上生物量与地下生物量比值分别为 3.32:1 和 3.99:1，对于估计山杨和油松地下生物量具有重要参考价值。

(2) 本研究得出山杨和油松各器官生物量拟合的最优模型形式均为 CAR 类型，和胥辉^[12]对两种生物量模型比较研究结果一致，且 CAR 模型解释量均超过 92%。

对于增加树冠特征变量能较准确预测叶和枝的生物量，本研究只得到油松的研究结果和前人的研究结果相似^[18]，而对山杨的研究并没有得到类似的结果，是因为树冠特征变量只是针对针叶树种有这样特性还是对阔叶也有类似特性还需要再增加山杨样本数或做其他阔叶树种的进一步验证。

山杨的干、地上部分和整株生物量的预测由 $W = aD^b$ 模型拟合的效果最好，模型解释量均达到 97% 以上；油松的干、地上部分和整株生物量的预测由 $W = a + b(D^2H)$ 模型拟合效果最好，模型解释量均达到 97%。Bond 和 Pastor 等^[19-20]认为树高不宜单独对各器官生物量进行预测，这和本研究结果一致。

根系的挖掘本身工作量就很大，而且要全部根系不丢失的挖掘基本上不可能，所以异速生长模型的研究基本上也主要集中在地上部分生物量^[8]，对地下生物量研究相对较少。本研究通过对粗根(>5 mm)生物量进行拟合，研究结果显示 D^2H 变量对山杨和油松根生物量预测效果最好。

在实际当中，对最优模型的选取还要看不同变量的可获取性，虽然模型加入较多的变量在一定程度上能提高其预测精度，但有些变量本身获取就增加了调查的工作量，这样也降低了模型的实用性^[9]。本研究基于树木胸径 D 的山杨和油松各器官单变量模型可解释量除叶(解释量 > 83%)外均达到或超过了 90%。而胸径在实际调查工作中最易获取，且调查误差较小，所以本研究认为利用树木胸径 D 就能较好地预测山杨和油松各器官生物量，更具有生产实践意义。

致谢:本文在外业取样过程中得到山西省方山县林业局高海平工程师和马保明工程师,北京林业大学生物学院曲红老师,水土保持学院彭孝飞、颜楠和舒鑫等同学的大力帮助,在此一并表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] Landsberg J J, Linder S, Mcmurtrie R E. Effects of global change on managed forests; A strategic plan for research on managed forest ecosystems in a globally changing environment[C]//Global Change and Terrestrial Ecosystems Report. Canberra: Core Project of the IGBP, 1995:1-17.
- [2] Lieth H, Whittaker R H. Primary Productivity of the Biosphere[M]. New York:SpringerVer-lag,1975.
- [3] Waring R H, Running S W. Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales[M]. San Diego, California: Academic Press, 1998.
- [4] Goodale C L, Heath L S, Houghton R A, et al. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere[J]. Ecological Applications, 2002, 12(3):891-899.
- [5] West P W. Tree and Forest Measurement[M]. Berlin: Springer, 2004:167.
- [6] 刘琪璟. 嵌套式回归建立树木生物量模型[J]. 植物生态学报, 2009, 33(2):331-337.
- [7] 李春萍, 李刚, 肖春旺. 异速生长关系在陆地生态系统生物量估测中的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2007, 29(2):51-57.
- [8] 邱扬, 张金屯, 柴宝峰, 等. 晋西油松人工林地上部分生物量与生产力的研究[J]. 河南科学, 1999(17):72-79.
- [9] 孙继超. 太岳山油松人工林生物量和碳储量研究[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [10] 彭孝飞, 王百田, 迟璐, 等. 油松林木地上部分生物量研究[J]. 广东农业科学, 2012(1):42-45.
- [11] Wang C Y. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temper-ate forests[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 222(1/3):9-16.
- [12] 胥辉. 两种生物量模型比较[J]. 西南林学院学报, 2003, 23(2):36-39.
- [13] 王秀云. 不同年龄长白落叶松人工林碳储量分布特征[D]. 北京:北京林业大学, 2011.
- [14] 冯力著. 回归分析方法原理及 SPSS 实际操作[M]. 北京:中国金融出版社, 2004.
- [15] Houghton R A, Lawrence K T, Hackler J L, et al. The spatial distribution of forest biomass in the Brazilian Amazon: A comparison of estimates [J]. Global Change Biology, 2001, 7(7):731-746.

(下转第 159 页)

x 方向的运动的功能,恰好满足了河道沿岸渣场束窄河道,改变水流在 x 方向流态的条件,更好地模拟了河道被束窄后河道洪水的水流流态。

对于河道水面线而言,模型计算可以得到整个河道的水位变化,而能量方程只能得到某几个断面的水位,特别是在编制水土保持方案水文水情资料缺乏的条件下,适用性较模型差。对于所需要的渣场修建前后河道水位变幅,模型计算能够完整地反映出修建渣场位置河道的水位和水流流态变化,不仅得到了河道束窄段水面线的波动,更可以清晰地看出河道流场变化,对选择和设计渣场的防护措施具有积极的促进作用。

[参 考 文 献]

- [1] 操昌碧. 水库型弃渣场水土保持工程措施的设计[J]. 水电站设计, 2009, 25(3): 46-51.
- [2] 周天佑. 河谷类弃渣场防护设计中的几个问题[J]. 四川水利, 2010(6): 59-61.
- [3] 王峥, 林锋, 赵如雄. 强度折减法在锦屏水电站对外专用公路 13# 渣场边坡稳定性分析中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2010, 46(2): 16-18.
- [4] 罗雷, 何丙辉. 弃渣场堆渣及挡渣墙稳定性分析[J]. 水土保持应用技术, 2006(5): 35-37.
- [5] 陈永亮, 蔡德志. 影响弃渣场稳定的因素及针对性治理措施探讨[J]. 西部探矿工程, 2009(12): 32-34.
- [6] 徐永年, 田卫宾. 开发建设项目弃渣场设计及防洪问题[J]. 中国水土保持, 2003(2): 23-24.
- [7] 庄佳, 赖冠文, 张小峰, 等. 弃渣场与大桥工程对防洪影响的计算与分析[J]. 中国农村水利水电, 2008(1): 78-81.
- [8] 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [9] 《山区航道整治》三结合组. 山区航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1974.
- [10] 交通部水运规划设计院, 交通部天津水运工程研究所. 航道整治水力计算[M]. 辽宁 沈阳: 长江航道局出版社, 1992.
- [11] 王志力, 耿艳芬, 金生. 山区性河流水面线计算改进[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(3): 433-437.
- [12] 黄辉. 河道一维水力计算参数的研究[D]. 四川 成都: 四川大学, 2004.
- [13] 刘默, 韩程起. 用能量方程计算河道水面线方法讨论[J]. 黑龙江水利科技, 2005, 33(3): 10-11.
- [14] 杨星, 李朝方, 刘志龙. 桥梁桩群存在条件下的河道水面线计算方法研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2011, 45(1): 59-62.
- [15] 万五一, 江春波, 李玉柱. 变步长法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(4): 647-649.
- [16] 邢贞相, 付强, 孙兵. 实码加速遗传算法在天然河道水面线计算中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(5): 60-63.
- [17] 孙德强, 胡方, 姜国徽. MIKE 21 模型在白浪河治理工程中的应用[J]. 山东水利, 2009(6): 25-28.
- [18] Peichl M, Arain M A. Allometry and partitioning of above-and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2007, 253(1/3): 68-80.
- [19] Bond L B, Wang C, Gower S T. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of Northern Manitoba [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(8): 1441-1450.
- [20] Pastor J, Aber J D, Melillo J M. Biomass prediction using generalized allometric regressions for some northeast tree species[J]. Forest Ecology and Management, 1984, 7(4): 265-274.
- [17] 魏艳敏. 荒漠环境规模化人工杨树林生物量和碳储量研究[D]. 新疆 乌鲁木齐: 新疆大学, 2010.
- [18] 汪金松, 张春雨, 范秀华, 等. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3918-3927.

(上接第 155 页)