

## 重庆缙云山不同植被类型对地表径流系数的影响

张洪江, 孙艳红, 程云, 程金花

(北京林业大学 水土保持学院, 北京 100083)

**摘要:** 为探索影响地表径流系数因素的主次关系, 利用灰色理论对重庆缙云山不同植被类型的草本层盖度、枯落物厚度、灌木层盖度和郁闭度影响地表径流的因素进行了灰关联分析。结果表明, 所选取的植被状况参数对地表径流系数影响的大小顺序是: 草本层盖度(0.7720) > 枯落物厚度(0.7445) > 灌木层盖度(0.6661) > 郁闭度(0.6142); 不同植被类型的植被状况对地表径流系数的影响, 针阔混交林和常绿阔叶林的植被状况对地表径流系数的影响大, 其灰关联度分别为0.6346和0.6185, 而楠竹林对地表径流系数的影响最小, 其灰关联度为0.5000。灰色关联法分析结果进一步证实了针阔混交林和常绿阔叶林具有良好的水文生态功能。

**关键词:** 灰关联; 关联度; 植被状况; 地表径流系数

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2006)06-0011-03

## Effect on Surface Runoff Coefficient of Different Vegetation Types in Jinyun Mountain of Chongqing

ZHANG Hong-jiang, SUN Yan-hong, CHENG Yun, CHENG Jin-hua

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** To probe into the primary and secondary relation of factors influencing runoff coefficient, based on the grey system theory, a grey correlation analysis on factors which is herb layer coverage, litter layer thickness, shrub layer coverage and canopy density surface runoff was made, using the data measured in different vegetation types of Jinyun mountain, Chongqing. The results indicate that the effects on surface runoff coefficient by the parameters of vegetation status is herb layer coverage (0.7720) > litter layer thickness (0.7445) > shrub layer coverage (0.6661) > canopy density (0.6142). The mixed wood and broadleaf forest has better effect on surface runoff coefficient in different vegetation types, the grey correlation degree is 0.6346, 0.6185 in turn. The bamboo forest has the smallest effect on surface runoff coefficient, the grey correlation degree is 0.5000. It is prove the mixed wood and broadleaf forest has better hydrological and ecological function.

**Key words:** grey correlation; correlation degree; vegetation status; surface runoff coefficient

植被对径流的影响是众多科学家已经都认知的问题, 主要表现在阻滞地表径流、延长入渗时间、影响水量的再分配等。影响地表径流的因素研究主要集中在雨强<sup>[1~2]</sup>、土地类型、坡度<sup>[3]</sup>、凋落物厚度<sup>[1~4]</sup>、灌草盖度<sup>[1]</sup>、土壤含水量<sup>[1~2]</sup>、土壤类型<sup>[3]</sup>和土壤紧实度等方面。相关研究得出的地表径流量与影响因素的关系为: 与雨强成幂函数关系<sup>[1]</sup>; 与灌草盖度呈负线性相关<sup>[4]</sup>、对数正相关<sup>[1]</sup>; 与凋落物层厚度呈负相关<sup>[3]</sup>、幂函数关系<sup>[1]</sup>; 与坡度呈正相关<sup>[3]</sup>、指数函数关系<sup>[1]</sup>; 与土壤初始含水量呈负线性相关<sup>[1]</sup>等。

地表径流是地表水蚀的主要源动力之一, 是洪水流量的主要成分<sup>[5]</sup>, 以其所具有的能量侵蚀土壤、改变流域的地貌特征。森林生态系统具有较强的调节转换径流功能, 尤其是森林生态系统能将大量的地表径流快速转化为慢速流, 从而减少径流功能。在降水和太阳辐射变化不大的情况下, 森林具有较高的蒸发散和较强的对土壤疏干能力, 因而减少径流量, 而且还通过对土壤通透性的改善, 使较多的降水转化为壤中流和地下径流<sup>[6~10]</sup>, 起到防治水土流失、涵养水源、改善河流水文状况及减轻洪涝灾害等作用, 并使得河流在枯水期间仍能维持一定的流量, 对于开发和利用有限的水资源、消洪减灾、森林涵养水源效益的评价及退化生态系统恢复成效的衡量都是非常有益的<sup>[11]</sup>。重庆缙云山位于三峡工程库区尾端, 拥有完整的亚热带常绿阔叶林群落类型, 并在一定程度上反映了中亚热带森林生态系统的天然本底, 是研究森林涵养水源和理水功能的天然实验室。本

收稿日期: 2006-05-12

基金项目: 国家重点基础研究发展“973”计划“长江上游环境变化与产水产沙作用机理”(2003CB415202-3)资助。INTERNATIONAL FOUNDATION FOR SCIENCE “The spatial variability of soil water movement properties with macropores in forestland in Jinyun Mountain region in China”(W/3430-1)

作者简介: 张洪江, 男, 生于1954年, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 流域管理和土壤侵蚀。E-mail: zhanghj@bjfu.edu.cn

文试图运用灰色关联法对重庆缙云山不同植被类型与其地表径流系数进行系统分析,以期探索植被类型影响地表径流系数的适宜定量方法。

## 1 试验区概况

研究区位于重庆市北碚区缙云山自然保护区内,即北纬 $29^{\circ}45'$ ,东经 $106^{\circ}22'$ ,最高处海拔951.5 m,相对高差600 m。该区为典型的中亚热带常绿阔叶林气候带,年均气温 $13.6^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量1 611.8 mm,年平均蒸发量777.1 mm。土壤以酸性黄壤及水稻土为主,缙云山保护区主要植被为常绿阔叶林,暖性针叶林,竹林,常绿阔叶灌丛,另外还有亚热带灌草丛和水生植被。主要树种为马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、丝栗(*Castanopsis fargesii* Franch)、华山松(*Pinus armandii* Franch)、四川大头茶(*Gordonia Szechuanensis* Chang)和山矾(*Symplocos setchuanensis* Brand)等<sup>[10]</sup>。在该自然保护区内选取针阔混交林、常绿阔叶林和楠竹林3种植被类型对不同植被类型与其地表径流系数进行研究。

## 2 研究方法

表1 标准地基本情况

### 2.1 标准地调查

2004年7月中旬,在研究区内选取针阔混交林、常绿阔叶林和楠竹林3种不同植被类型的标准地进行调查,确定其海拔、坡向和坡度,以及林分的林龄、郁闭度和枯落物厚度(见表1)。

### 2.2 降雨和地表径流测定方法

在径流小区内,降雨产生的径流在集流槽聚集,水流通过集流槽下端导管进入观测房,每个观测房配置了监测径流变化状况的自动记录仪器(LT9801A 数据记录仪),自动记录不同小区地表径流的变化过程。与径流小区配套建立雨量观测点,利用自记雨量计,记录观测每次降雨量和降雨过程。

### 2.3 灰色关联度计算方法

灰关联是指事物之间不确定性关联,或系统因子与主行为因子之间的不确定性关联。灰关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近,以分析和确定因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度,而进行的一种分析方法<sup>[12~14]</sup>。设 $x_1, x_2, \dots, x_N$ 为 $N$ 个因素,反映各因素变化特性的数据列分别为 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t), t = 1, 2, \dots, M$ 。

因素 $x_i$ 对 $x_j$ 的关联系数为: 
$$\xi_{ij}(t) = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij}(t) + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}(t)}{\Delta_{ij}(t) + \rho \max_i \max_j \Delta_{ij}(t)}$$

式中: $\xi_{ij}(t)$ 为关联系数; $\Delta_{ij}(t)$ 为比较数列与参考数列各对应点的绝对差值; $\rho$ 为分辨系数, $\rho$ 越小,分辨率越大,一般取 $\rho = 0.5$ (徐建华,2002)。在本研究中 $N = 1, 2, 3, \dots, 6, t = 1, 2, 3, 4$ 。

灰关联度 $\lambda_{ij}$ 平权法求得,计算式为<sup>[15]</sup>: 
$$\lambda_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{ij}(t)$$

## 3 结果与分析

### 3.1 植被参数对地表径流系数的影响

2002~2004年选5场不同类型的降雨,即小雨、中雨、大雨、暴雨和特大暴雨,选取原则是数据较完整,有一定的径流效应。场降雨划分以超过1 h 算作下一场降雨,零散微量降雨视地下径流持续的情况归入前面的场降雨或舍去。计算出每场降雨的平均雨强(mm/h),并将其换算为(mm/d)的雨强单位,对降雨强度等级的划分标准为:日降雨量小于10 mm/d 为小雨,10.1~25 mm/d 为中雨,25.1~50 mm/d 为大雨,50.1~100 mm/d 为暴雨,100.1~200 mm/d 为大暴雨,200 mm/d 以上为特大暴雨<sup>[16]</sup>。对于降雨因子统计其降雨量、降雨历时、降雨强度、降雨峰值和前3天降雨量,对于地表径流因子统计其径流量、径流系数、径流历时、初损历时和峰值。各降雨径流特征值见表2、表3、表4和表5。

将5场降雨的降雨量取平均值,相对应的3种植被类型的地表径流量取平均值,根据地表径流系数的计算公式,求得地表径流系数。不同植被类型地表径流系数和植被状况参数见表6。

表2 重庆缙云山5场降雨的降雨特征值

日期	降雨量 (mm)	降雨 类型	降雨历时 (min)	平均雨强 (mm/h)	降雨峰值 (mm/min)	前期3天降 雨量(mm)
2003-11-10	3.9	小雨	570	0.41	0.02	36.7
2003-05-26	11.7	中雨	19	0.62	0.06	0.0
2003-05-16	19.0	大雨	1020	1.11	0.09	28.8
2002-05-12	47.3	暴雨	1200	2.37	0.14	1.6
2004-09-04	57.2	特大暴雨	360	9.53	0.62	4.9
平均	27.8	—	—	—	—	—

植被减少和调节地表径流的功能主要在于植被增加了土壤表面的粗糙度。从各径流小区内植被状况可以看出(表6),针阔混交林和常绿阔叶林的灌木层盖度高、枯落物层厚,但草本层盖度比楠竹林低。

为了消除各参数间量纲的不同,首先对各参数数列进行生成处理,本文采用最大值化的处理方法,在各组参数中选取其中的最大值作为标准,然后把每组的所有参数与其对应的最大值相除,所得比值生成新的数列,见表7。

选取地表径流系数为参考数列,植被参数为比较数列,求比较数列与参考数列各对应点的绝对差值,根据灰关联系数的计算公式,求得各参数对应点与地表径流系数间的灰关联系数,见表8。由灰色关联度的计算公式,分别求出植被参数与地表径流系数之间的灰关联度:郁闭度的灰关联度为0.614 2,灌木层盖度的灰关联度为0.666 1,枯落物厚度的灰关联度为0.744 5,草本层盖度的灰关联度为0.772 0。可见,植被状况参数的灰关联度大小依次为:草本层盖度>枯落物厚度>灌木层盖度>郁闭度。灰关联度越大,说明比较数列与参考数列的关联程度越紧密,或者说比较数列对参考数列的影响就越大。从表8可以看出,植被状况参数与地表径流系数之间的灰关联度均较大,最小值为0.614 2,最大值为0.774 5,也就是说,植被状况参数对地表径流系数影响均较大,其中最大的是草本层盖度,最小的是郁闭度。

### 3.2 植被类型对地表径流系数的影响

地表径流系数是反映一个地区的降雨量有多少形成了径流,它综合反映了一个地区内地质土壤和植被等地表状况对径流的影响。重庆缙云山3个径流小区相互毗邻,地质状况差异不大,因而可比性强,能突出植被对地表径流的影响效应。楠竹林的地表径流系数为0.231 9,针阔混交林的地表径流系数为0.086 3,常绿阔叶林的地表径流系数只有0.024 3(见表6),楠竹林的地表径流系数是常绿阔叶林的9.5倍,楠竹林的地表径流系数约是针阔混交林的2.7倍,这说明常绿阔叶林和针阔混交林的植被状况对地表径流系数的影响大,而楠竹林对地表径流系数的影响小。

表8 植被状况参数与地表径流系数间的灰关联系数

植被类型	郁闭度 (%)	灌木层盖度 (%)	草本层盖度 (%)	枯落物厚度 (cm)
针阔混交林	0.47	1.00	0.33	1.00
常绿阔叶林	0.37	0.33	0.98	0.33
楠竹林	1.00	0.67	1.00	0.90

表3 针阔混交林5场降雨地表径流因子统计

降雨场次	地表径流量 (mm)	径流系数	峰值 (mm/min)	径流历时 (min)	初损历时 (min)
1	0.1125	0.0288	—	500	140
2	0.3529	0.0302	0.0031	1100	110
3	0.7364	0.0388	0.0036	930	160
4	4.6742	0.0988	0.0143	1330	20
5	6.1266	0.1071	0.0711	420	20
平均值	2.4005	—	—	—	—

表4 常绿阔叶林5场降雨的地表径流因子统计

降雨场次	地表径流量 (mm)	径流系数	峰值 (mm/min)	径流历时 (min)	初损历时 (min)
1	0.0877	0.0225	—	320	280
2	0.1365	0.0117	0.0010	930	260
3	0.4094	0.0215	0.0020	960	30
4	1.3062	0.0276	0.0039	1160	40
5	1.4427	0.0252	0.0176	240	20
平均值	0.6765	—	—	—	—

表5 楠竹林5场降雨的地表径流因子统计

降雨场次	地表径流量 (mm)	径流系数	峰值 (mm/min)	径流历时 (min)	初损历时 (min)
1	0.0797	0.0204	—	410	210
2	0.2392	0.0204	0.0018	990	210
3	0.5139	0.0270	0.0098	940	100
4	2.8789	0.0609	0.2410	1200	30
5	28.5240	0.4987	—	360	20
平均值	6.4473	—	—	—	—

表6 3种植被类型地表径流系数和植被状况参数

植被类型	径流系数	郁闭度 (%)	灌木层盖度 (%)	草本层盖度 (%)	枯落物厚度 (cm)
针阔混交林	0.0863	0.90	0.40	0.30	3.5
常绿阔叶林	0.0243	0.90	0.40	0.20	3.4
楠竹林	0.2319	0.85	0.10	0.80	1.4

表7 地表径流系数和植被状况参数的生成

植被类型	地表径流系数	郁闭度 (%)	灌木层盖度 (%)	草本层盖度 (%)	枯落物厚度 (cm)
针阔混交林	0.3721	1.00	1.00	0.38	1.00
常绿阔叶林	0.1048	1.00	1.00	0.25	0.97
楠竹林	1.0000	0.94	0.25	1.00	0.40

表9 3种植被类型参数的灰关联系数

植被类型	郁闭度 (%)	灌木层盖度 (%)	草本层盖度 (%)	枯落物厚度 (cm)
针阔混交林	1.00	0.56	0.38	0.61
常绿阔叶林	1.00	0.56	0.33	0.59
楠竹林	0.33	0.33	1.00	0.33

选取植被状况参数最大化后,各参数的最大值作为参考点,组成针阔混交林、常绿阔叶林和楠竹林3种植被类型的参考数列,即  $X_0 = \{1, 1, 1, 1\}^{[17]}$ ,仍选取植被状况各参数为比较数列,运用灰色关联分析方法,对不同植被类型对地表径流的影响进行定量评价,求得各对应点的关联系数,结果见表9。利用平权法求其灰关联度,结果为针阔混交林的灰关联度(0.634 6)>常绿阔叶林的灰关联度(0.618 5)>楠竹林的灰关联度(0.500 0),也可以看出楠竹林对地表径流系数影响较小。

## 4 结 论

(1)14种不同植被恢复措施的油松造林成活率与保存率均以绿化平台最高,其次为东北坡鱼鳞坑、东南坡鱼鳞坑,垒砌悬挂复绿法最差。

(2)4种植被恢复措施下油松的高生长、径生长量不同,其大小顺序均为东北坡向鱼鳞坑>坝后坡绿化平台>东南坡向鱼鳞坑>垒砌悬挂复绿法。

(3)不同植被恢复措施的客土质地、容重、孔隙度等物理性状通过影响土壤的透水、持水、贮水性能而影响油松生长;客土深度大有助于油松生长,客土量相当的情况下,小规格植穴的生长量要好于大规格植穴的生长量;客土量与油松高生长间呈对数相关关系,其相关系数随客土量减小而减小,但与径生长量间关系不明显。

### 参考文献:

- [1] 马祥华,等.黄土丘陵沟壑区退耕地植被恢复中土壤物理特性变化研究[J].水土保持研究,2005,12(1):17—21.
- [2] 卫智军,李青丰,贾鲜艳,等.矿业废弃地的植被恢复与重建[J].水土保持学报,2003,17(4):172—175.
- [3] 温仲明,焦锋,等.植被恢复重建对环境的影响研究进展[J].西北林学院学报,2005,20(1):10—15.
- [4] 彭少麟.恢复生态学植被重建[J].生态科学,1996,15(2):26—31.
- [5] 王仁卿.山东荒山植被恢复与重建的几个生态学问题[J].山东林业科技,1994(5):3—6.
- [6] 王治国,张云龙,刘徐师,等.林业生态工程学——林草植被建设的理论与实践[M].北京:中国林业出版社,2000.
- [7] 杨建国,安韶山,郑粉莉.宁南山区植被自然恢复中土壤团聚体特征及其与土壤性质关系[J].水土保持学报,2006,20(1):72—75,78.
- [8] 庞学勇,刘庆,等.人为干扰对川西亚高山针叶林土壤物理性质的影响[J].应用与环境生物学报,2002,8(6):583—587.
- [9] 姜培坤,周国模,钱新标.侵蚀型红壤植被恢复后土壤养分含量与物理性质的变化[J].水土保持学报,2004,18(1):12—14.
- [10] 李景文主编.森林生态学[M].北京:中国林业出版社,1994.

上接第13页

## 4 结 论

通过灰关联分析,找出了影响地表径流系数因素的主次关系,即植被状况参数的灰关联度大小依次为:草本层盖度>枯落物厚度>灌木层盖度>郁闭度。

用灰色关联法分析的结果进一步证实了针阔混交林和常绿阔叶林具有良好的水文生态功能。楠竹林由于植物层次单一,枯落物厚度较小,因此,其地表径流系数较大,水土流失比较严重。

本文分析了影响地表径流系数的郁闭度、灌木层盖度、草本层盖度和枯落物厚度等4种因素,但实际其影响因素还不止这些,例如降雨量、降雨强度、降雨历时和前3天降雨情况等需要在今后的研究中不断完善。

### 参考文献:

- [1] 袁建平,等.影响坡地降雨产流历时的因子分析[J].山地学报,1999,17(3):259—264.
- [2] 马琨,等.模拟暴雨下红壤坡面产流产沙及养分流失特征研究[J].宁夏农学院学报,2004,25(1):1—4.
- [3] 杨春霞,等.人工模拟坡面产流产沙试验研究[J].中国水土保持,2003(6):24—26.
- [4] 张光辉,梁一民.模拟降雨条件下人工草地产流产沙过程研究[J].水土保持学报,1996,10(3):56—59.
- [5] 孙阁.林地地表径流的研究[J].水土保持学报,1989,3(2):52—55.
- [6] 王云琦,王玉杰,朱金兆,等.森林与坡面产流研究[J].水土保持学报,2004,18(5):59—63.
- [7] 张友静,方有清.森林对径流特征值影响初探[J].南京林业大学学报,1996,20(2):34—38.
- [8] Zhang Zhiqiang, Wang Lixian, et al. Forest hydrology research in China[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2):68—73.
- [9] 何凡,张洪江,史玉虎,等.长江三峡花岗岩地区降雨因子对优先流的影响[J].农业工程学报,2005,21(3):75—78.
- [10] 陈引珍,何凡,张洪江,等.缙云山影响林冠截留量因素的初步分析[J].中国水土保持科学,2005,3(3):69—72.
- [11] 刘士余,左长清.植被对径流影响的研究综述[J].国土与自然资源研究,2005,27(2):42—43.
- [12] 刘玉成,钟章成,等.缙云山自然保护区植被概括[A].钟章成主编.常绿阔叶林生态学研究[M].重庆:西南师范大学出版社,1988.
- [13] 刘思峰,郭天榜.灰色系统理论及其应用[M].开封:河南大学出版社,1991.
- [14] 邓聚龙.灰色理论基础[M].武汉:华中科技大学出版社,2002.
- [15] 傅立.灰色系统理论及其应用[M].北京:科学技术文献出版社,1992.
- [16] 贺庆棠.气象学[M].北京:中国林业出版社,1988.
- [17] 闫俊华,周国逸,申卫军.用灰色关联法分析森林生态系统植被状况对地表径流系数的影响[J].应用与环境生物学报,2000,6(3):197—200.