

渝北不同模式水源涵养林植物多样性 及其与土壤特征的关系

赵洋毅¹, 王玉杰^{1*}, 王云琦¹, 赵占军¹, 刘楠¹, 陈林²

1. 北京林业大学水土保持学院//水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 重庆缙云山国家级自然保护区管理局, 重庆 400700

摘要:以重庆缙云山8种不同构建模式的水源涵养林及林地土壤为研究对象,用物种多样性指数(Simpson指数、Shannon-Wiener指数)、均匀度指数(Pielou指数)和物种丰富度指数(Margalef指数)以及用土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH值、有机质、全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量12个指标表征土壤的物理性状和养分特征,分析了8种群落的植物多样性、土壤特征及二者的相互关系。结果表明:物种多样性以广东山胡椒(*Lindera kwangtungensis*)×杉木(*Cunninghamia lanceolata*)混交林最高。马尾松(*Pinus massoniana*)×广东山胡椒混交林次之,马尾松×柳杉(*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk)混交林和毛竹(*Phyllostachys pubescens*)纯林最低。各模式林地土壤特征差异显著,以毛竹纯林土壤质量最差。在该地区针阔混交林对提高物种多样性和改良土壤作用显著,针叶林及纯林则较差。物种多样性指数与土壤特征因子的相关性分析表明,不同模式水源林群落植物多样性与土壤特征因子存在一定相关性,其中与土壤物理性状特征关系不显著,与养分特征关系显著。全N与全K与四个多样性指数呈显著或极显著的正相关,Shannon-Wiener指数、Simpson指数和有机质、阳离子交换量、速效P呈显著的正相关,特别是有机质和全N两因子与物种多样性关系最密切。

关键词:渝北;水源涵养林;构建模式;物种多样性;土壤特征

中图分类号: S718.5

文献标识码: A

文章编号: 1674-5906(2009)06-2260-07

物种多样性是一个群落结构和功能复杂性的度量,表征着生物群落和生态系统的结构复杂性,是揭示植被组织水平的生态学基础^[1],对物种的多样性研究能够得出群落的结构类型、组织水平、发展阶段、稳定程度和生境差异等^[2]。物种多样性在许多植被的建设和恢复中作为评价的指标之一^[3-4]。在一个森林生态系统中,土壤和植被作为两个重要因子,二者关系相互依存,植被影响土壤,土壤制约植被^[5],国内外现有对二者之间关系的研究报道较多,涉及到的领域多集中于森林群落^[1,6-7],草原群落和人工草地群落^[8-9],退化沙质草地和盐碱沙地群落^[10-12]以及湿地植物群落^[13],而对水源涵养林的树种搭配及空间配置对物种多样性的影响和水源地土壤特征与群落多样性关系的研究较少。

重庆北部的缙云山地区位于长江三峡库区的尾端,作为重庆市的重要水源区之一,水源涵养林建设是水源区保护的重要内容,水源涵养林具有调节径流、净化水质、保持水土、调洪等不可替代的水源保护功能。优化配置森林体系可以有效地提高群落的物种多样性,进而提高森林的水源涵养功能。本文以缙云山水源涵养林试验示范林区的8种

不同构建模式的水源涵养林群落及林地土壤为研究对象,调查分析了各林分群落植物多样性特征、土壤理化因子及二者之间的关系,旨在从营林角度,探讨物种多样性及其与土壤特征的相互关系,为长江三峡库区的水源涵养林建设和防治水土流失提供一定的理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区境内嘉陵江小三峡之温塘峡西岸的缙云山自然保护区(106°22'E, 9°49'N),海拔350~951.5 m,具有亚热带季风湿润性气候特征,年平均气温13.6℃,年均降水量1611.8 mm,年平均蒸发量777.1 mm,年均日照1293.9 h。土壤以酸性黄壤土为主。主要的乔木树种有四川大头茶(*Gordonia acuminata*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、四川山矾(*Symplocos setchuanensis*)、四川杨桐(*Adinandra bockiana*)、广东山胡椒(*Lindera kwangtungensis*)、毛竹(*Phyllostachys pubescens*)等;灌木以细齿叶柃(*Euryanitida Korthals*)、白毛新木姜子(*Neolitea aurata*)、野蔷薇(*Rosamultif lora*)、草珊瑚

基金项目:国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD03A1802);国家自然科学基金项目(30671661);国家林业局“948”项目(2007-4-14)

作者简介:赵洋毅(1980年生),男,博士研究生,主要从事森林水文和山地灾害防治研究。E-mail: yzhaoyao@126.com

*通讯作者, E-mail: wuyujie@bjfu.edu.cn

收稿日期: 2009-10-20

(*Sarcandra glabra* (Thunb.) Nakai) 等；草本以蕨 (*Pteridium aquilinum* var. *latiusculum*)、芒 (*Miscanthus sinensis*) 等。试验示范区林地总面积约为 33.5 hm²，为 8 种不同构建模式的水源涵养林，采用株间混交方式，株行距 2 m×2 m。

1.2 研究方法

采用机械布点和典型样方法进行常规群落学调查，样方大小按乔、灌、草分开，其中乔木样方 10 m×10 m，灌木 2 m×2 m，草本 1 m×1 m。共调查样方 144 个，其中乔木 32 个，灌木 48 个，草本 64 个。乔木的调查包括：乔木种类、株数、胸径、树高、冠幅、郁闭度；灌木和草本的调查，记录每个种的名称、多度和高度。另外，对每个样地，测其海拔、坡向、坡度和坡位，并取混合土样带回室内风干、研磨过筛进行分析。土壤特征参数选用常用的理化性质参数，包括：土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH 值、有机质含量、全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量 (CEC)，各指标均参照国标采用常规方法测定^[14-15]。各样地的基本概况信息见表 1。

表 1 不同水源涵养林地基本概况

编号	树种混交模式	物种数	郁闭度	海拔 /m	坡度 / (°)	坡向
I	四川大头茶×四川山矾混交林	21	0.7	825	22	NW
II	毛竹×四川山矾×马尾松混交林	21	0.8	810	17	N
III	马尾松×广东山胡椒混交林	25	0.7	790	20	NW
IV	毛竹纯林	16	0.6	800	13	NW
V	广东山胡椒×杉木混交林	31	0.7	810	10	NW
VI	马尾松×柳杉混交林	17	0.4	770	20	N
VII	广东山胡椒×四川杨桐混交林	32	0.9	850	15	N
VIII	马尾松×四川大头茶混交林	23	0.8	760	21	NW

本次调查涉及到的物种数乔木 8 个，灌木 14 个，草本 21 个。多样性的测度选用丰富度指数、均匀度指数和物种多样性指数 3 类共 4 个指标。调查的物种乔木有：四川大头茶、四川山矾、杉木、马尾松、广东山胡椒、毛竹、四川杨桐、赤叶杨 (*Alniphyllum fortuneikwangtungensis*)，灌木有：白毛新木姜子、细齿叶柃、川柃 (*Eurya fangii*)、菝葜 (*Smilax china*)、杜茎山 (*Maesa japonica*)、缙云瑞香 (*Daphne jinyunensis* C.Y.Chang)、长叶胡颓子 (*Elaeagnus bockii*)、光叶山矾 (*Symplocos lancifolia* Sieb.)、草珊瑚、尖连蕊茶 (*Camellia cuspidata*)、污毛粗叶木 (*Lasianthus japonicus*)、西南悬钩子 (*Rubus assamensis*)、棠叶悬钩子 (*Rubus malifolius*)、山莓 (*Rubus corchorifolius*)，草本有：

蕨、芒、里白 (*Diplopterygium glauca*)、狗脊蕨 (*Woodwardia japonica*)、淡竹叶 (*Lophatherum gracile* Brongn.)、花叶冷水花 (*Pilea cadierei* Gagnep. et Guill.)、竹叶草 (*Oplismenus compositus* (L.) Beauv.)、鸭跖草 (*Commelina communis* var. *hortensis*)、蝴蝶花 (*Iris japonica*)、萱草 (*Hemerocallis fulva* (L.) L.)、野苘蒿 (*Crassocephalum crepidioides*)、小飞蓬 (*Comnyza canadensis* (L.) Cronq.)、地瓜藤 (*Caulis Fici Tikouae*)、乌蕨 (*Stenoloma chusanum*) 等。

1.3 多样性指数及计算

本文选用目前使用较多的 4 个物种多样性计算模型：Margalef 丰富度指数 (R)、Shannon-Wiener 多样性指数 (H)、Simpson 优势度指数 (D)、Pielou 均匀度指数 (E) 来计算不同模式水源林群落的物种多样性^[16]。各指数公式如下：

$$R=(S-1)/\ln N; H=-\sum_{i=1}^S\left(\frac{N_i}{N}\right)\ln\left(\frac{N_i}{N}\right);$$

$$D=1-\sum_{i=1}^S\frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)}; E=H/\ln S$$

式中： S 为各群落的物种数目； N_i 为群落中某一层级第 i 个物种的重要值； N 为该层级所有物种重要值之和。将群落各层级多样性指数相加得到群落物种总体多样性指数^[16,17]。其中重要值^[16]计算：乔木重要值=(相对密度+相对优势度+相对频度)/3；灌草重要值=(相对多度+相对盖度+相对频度)/3。数据用 Excel2007 和 SPSS13.0 进行处理。

2 结果与分析

2.1 不同模式水源涵养林群落物种多样性特征

由于马尾松、广东山胡椒、杉木、四川大头茶、毛竹等属于重庆缙云山的优势树种，也是重庆北部水源区构建水源涵养林的主要树种，因此合理配置树种构建混交林，最大程度地提高林分的物种多样性水平和提高涵养水源的能力则显得极为重要。由于物种多样性是一个综合量度，进行物种多样性分析时应将各多样性测度指标进行全面考虑^[17]。不同模式水源涵养林群落乔木层、灌木层、草本层和群落总体的物种多样性指数值见表 2。它反映了不同造林模式下的林分类型在植物物种多样性上的差异。

在乔木层，优势树种主要为造林时的树种，同时伴生有一些其它乔木种。乔木层物种 Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数和 Pielou 均匀度指数均以马尾松×广东山胡椒混交林(III)最大，其多样性程度最高。各指数大小分别为：1.803、1.443、0.826 和 0.899。毛竹纯林(IV)的多样性指数最小，其乔木层多样性程度最低。马尾松×广东山胡

椒混交林, 由于该林分乔木层物种组成除马尾松和广东山胡椒外, 还伴生有少数的四川山矾、四川杨桐以及杉木, 乔木组成相对最丰富, 乔木层植物多样性程度最高。而由于毛竹纯林林内只有毛竹一个乔木树种, 因此其乔木层的物种多样性指数为0。马尾松×柳杉混交林(VI)由于该林地是马尾松火烧迹地, 后通过补植柳杉而成林, 原有马尾松大面积死亡, 而柳杉生长状况较差, 死亡比较严重, 乔木种少, 且数量小, 因此该模式下的乔木层物种多样性程度也相对较低。

灌木层中, 以广东山胡椒×杉木混交林(V)的Margalef指数、Shannon-Wiener指数、Simpson指数、Pielou均匀度指数最高, 各指数大小分别为: 1.578、1.428、0.736和0.791; 毛竹纯林(IV)的多样性指数、均匀度指数最低, 各指数大小仅为: 0.152、0.617、0.197和0.031。在8种模式的水源涵养林群落中, 灌木层物种多样性程度最高的广东山胡椒×杉木混交林各指数比最低的毛竹纯林分别高出9.38倍、1.31倍、2.73倍和24.52倍。广东山胡椒×杉木混交林灌木层物种多样性虽然最高, 但与除毛竹纯林以外的另外6种森林类型相比灌木层物种多样性程度相差不大, 这与林下的灌木种类及分布状况差异不大有关, 说明常绿阔叶混交林和针阔混交林对提高灌木层物种多样性作用较好, 而毛竹纯林则最差。

草本层中, 综合比较8种模式林型草本层的物种多样性指数, 其中以广东山胡椒×杉木混交林(V)最大, 广东山胡椒×四川杨桐混交林(VII)的最小, 毛竹纯林的草本层物种多样性指数相对比较仍然较小。由于广东山胡椒×杉木混交林中杉木的数量较多, 且杉木属喜光树种, 树冠较小, 郁闭度相对较小, 因而该林分下草本层的多样性最高。广东山胡椒×四川杨桐混交林(VII)草本层的多样性较低, 由于该林分属于常绿阔叶混交林, 郁闭度较高, 达到了90%以上, 透光度很低, 且林下灌木层物种多样性较高, 植物种间竞争激烈, 受这些林分环境影响造成该林分的草本层多样性较低; 而马尾松×柳杉混交林(VI)草本层多样性指数相对乔木层和灌木层则较大, 由于该林分的郁闭度较低, 林内地表光照充足, 且由于该地为火烧迹地, 土壤中含有大量木炭灰, 土壤肥力较高, 因此草本数量丰富, 分布均匀。

对各模式水源涵养林群落总体的物种多样性分析表明(表2), 不同模式水源林群落的植物多样性存在一定的差异。以Shannon-Wiener指数、Simpson指数的大小排序, 各林分物种多样性水平由高到低为: 广东山胡椒×杉木混交林(V) > 马尾松×广东山胡椒混交林(III) > 广东山胡椒×四川杨桐混交林(VII) > 毛竹×四川山矾×马尾松混交林(II) > 四

表2 不同模式水源林乔木层、灌木层、草本层和群落总体物种多样性参数

Table 2 Species diversity indexes of tree layer, shrub layer, herb layer and different water conservation forest communities

林分类型	植物层次	多样性指数			
		R	H	D	E
I	乔木层	0.932	1.113	0.579	0.785
	灌木层	1.214	1.165	0.594	0.801
	草本层	2.461	1.756	0.811	0.753
	群落总体	3.942	2.373	0.798	0.779
II	乔木层	1.082	1.141	0.638	0.811
	灌木层	1.097	1.141	0.573	0.716
	草本层	2.116	1.579	0.792	0.747
III	群落总体	3.532	2.635	0.805	0.865
	乔木层	1.803	1.443	0.826	0.899
	灌木层	1.321	1.024	0.644	0.743
IV	草本层	3.021	2.004	0.809	0.799
	群落总体	4.063	2.669	0.831	0.829
	乔木层	0.000	0.000	0.000	0.000
V	灌木层	0.152	0.617	0.197	0.031
	草本层	1.794	1.108	0.714	0.695
	群落总体	1.867	1.476	0.697	0.532
VI	乔木层	1.028	0.958	0.627	0.887
	灌木层	1.417	1.352	0.713	0.791
	草本层	3.275	2.213	0.869	0.862
VII	群落总体	4.358	2.679	0.846	0.78
	乔木层	0.353	0.362	0.316	0.682
	灌木层	0.951	1.003	0.521	0.692
VIII	草本层	3.212	2.263	0.827	0.821
	群落总体	1.992	1.517	0.701	0.535
	乔木层	1.087	1.211	0.725	0.843
IX	灌木层	1.578	1.428	0.736	0.735
	草本层	1.811	1.003	0.683	0.629
	群落总体	3.539	2.658	0.827	0.767
X	乔木层	1.535	1.608	0.767	0.871
	灌木层	1.154	1.025	0.618	0.672
	草本层	2.374	1.825	0.753	0.803
群落总体	3.617	2.128	0.792	0.688	

川大头茶×四川山矾混交林(I) > 马尾松×四川大头茶混交林(VIII) > 马尾松×柳杉混交林(VI) > 毛竹纯林(IV)。以Margalef指数和Pielou均匀度指数分析来看, 虽然大小排序存在差异, 但仍是以广东山胡椒×杉木混交林最高, 毛竹纯林最低。因此, 通过对8种不同模式水源涵养林乔木层、灌木层、草本层和群落总体的物种多样性分析可以看出, 各模式林型以广东山胡椒×杉木混交林的物种多样性水平最高。马尾松×广东山胡椒混交林次之, 物种多样性水平最低的两种模式林型分别为马尾松×柳杉混交林和毛竹纯林。马尾松×柳杉混交林中, 马尾松生长状况较差, 且柳杉的死亡现象也较重, 毛竹纯林物种较少, 分布不均, 物种多样性指数较小, 而同是与马尾松混交的马尾松×广东山胡椒混交林和马尾松×

四川大头茶混交林以及与毛竹混交的毛竹×四川山矾×马尾松混交林则生长较好，物种丰富，分布较均匀，物种多样性指数较高，同时8种模式中的常绿阔叶混交林物种多样性指数则相对也较大。这说明针阔混交林以及常绿阔叶林混交对提高物种多样性作用显著，针叶林及纯林则效果较差，由于针叶树种自身的缺陷，如枯落物分解困难、自肥能力较差等原因，其涵养水源和保持水土的能力相对于针阔混交林要差^[18]。因此可将针叶林改造为针阔混交林，纯林改造为混交林以提高其保持水土和涵养水源的能力。广东山胡椒×杉木混交林和马尾松×广东山胡椒混交林两种模式林型的物种多样性指数最高，表明在重庆缙云山地区以针阔混交林为主要造林模式的水源涵养林林型对提高物种多样性水平作用显著。

2.2 不同模式水源涵养林群落土壤特征分析

土壤容重、毛管孔隙度和非毛管孔隙度是土壤

持水性能的重要体现，综合反映了土壤的透水持水能力和基本物理性能^[19]。通常土壤容重越小，孔隙度就越大，土壤持水量也就越大；从土壤保水性能来看，毛管孔隙中的水可长时间保存在土壤中，主要用于植物根系吸收和土壤蒸发，而非毛管孔隙中的水可以及时排空，更有利于水分的下渗^[20]。pH值、有机质含量、全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量（CEC）指标属于土壤的养分指标，其各指标的大小则反映了土壤肥力的高低。土壤养分的高低直接影响植物的生长发育状况，它不仅增加土壤的保肥和供肥能力，提高土壤养分的有效性，而且可促进团粒结构的形成，改善土壤的透水性、蓄水能力及通气性，增加土壤的缓冲性等^[21]。各土壤特征因子在很大程度上影响了林地的功能，特别是对水源涵养林的涵养水源功能、保持水土和对森林群落物种多样性发展起到重要作用。

通过方差分析得出（表3），8种模式水源涵养

表3 不同模式水源涵养林土壤特征因子

Table 3 Soil characteristics factors of different models of water conservation forest

林分类型	土壤特征因子											
	容重 /(g·cm ⁻³)	毛管 孔隙度/%	非毛管 孔隙度/%	pH	有机质 /(g·kg ⁻¹)	全 N /(g·kg ⁻¹)	全 P /(g·kg ⁻¹)	全 K /(g·kg ⁻¹)	速效 N /(mg·kg ⁻¹)	速效 P /(g·kg ⁻¹)	速效 K /(mg·kg ⁻¹)	CEC /(cmol·kg ⁻¹)
I	1.15	51.64	6.19	4.17	17.40	2.88	0.64	13.12	76.69	7.70	42.02	9.93
II	1.10	46.44	9.23	4.05	22.05	2.38	0.29	10.74	134.32	3.18	32.05	12.25
III	1.11	49.57	14.13	4.07	30.45	2.00	0.22	10.26	97.91	2.43	64.46	10.95
IV	1.28	50.81	3.57	4.59	15.90	1.09	0.31	5.62	70.65	4.50	24.57	5.65
V	1.03	47.76	12.11	3.87	25.07	3.40	0.56	12.41	91.97	12.78	66.95	12.35
VI	1.07	48.32	6.66	3.94	39.20	3.09	0.28	7.72	160.92	5.23	58.22	14.35
VII	1.02	47.80	6.06	4.12	46.00	1.86	0.22	5.97	114.79	2.23	32.05	20.44
VIII	1.08	54.51	7.04	4.09	26.55	1.68	0.18	6.74	82.53	1.43	34.54	9.50
F 值	3.85*	3.71*	3.93*	5.18**	4.71**	4.46**	8.55**	21.51**	4.30**	4.93**	5.54**	7.68**

* $P < 0.05$ 显著，** $P < 0.01$ 极显著； $n=24$ ，下同

林地土壤理化因子呈显著或极显著差异，土壤物理性质特征差异显著，土壤养分特征差异均达到极显著性水平。说明不同造林模式对土壤性质的影响效果明显。从土壤物理特征来看，以广东山胡椒×杉木混交林(V)和马尾松×广东山胡椒混交林(III)两个林型孔隙状况最好，且容重较小，其中非毛管孔隙度分别为12.11%和14.13%，远好于其它模式林型。以毛竹纯林(IV)的土壤物理特征较差，其土壤容重最大，为1.28 g·cm⁻³，虽然毛管孔隙度相对较大，为50.81%，但由于其非毛管孔隙度仅为3.57%，水分的下渗能力差，进而影响了土壤的持水性，易产生地表径流，保持水土作用较差。从土壤养分特征来看，仍是以毛竹纯林的土壤养分状况最差。由于毛竹作为速生树种，在重庆缙云山地区分布广泛，且多以纯林为主，前文分析已知毛竹纯林的林分中物种很少，多样性最低。而该林型对提高土壤涵养

水源能力以及改良土壤质量方面作用效果同样较差，对于以营造水源涵养林为目的，从保持水土和涵养水源方面来看，建议造林时种植针阔叶树种来提高森林功能。因此，从土壤特征分析看出，在该地区针阔混交林对提高土壤质量作用显著。

2.3 不同模式水源林群落物种多样性与土壤特征关系分析

设土壤容重 X_1 ，毛管孔隙度为 X_2 ，非毛管孔隙度为 X_3 ，pH 值为 X_4 ，有机质含量为 X_5 ，全 N 为 X_6 ，全 P 为 X_7 ，全 K 为 X_8 ，速效 N 为 X_9 ，速效 P 为 X_{10} ，速效 K 为 X_{11} ，阳离子交换量为 X_{12} 与 Margalef 丰富度指数(R)、Shannon-Wiener 多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(D)、Pielou 均匀度指数(E)进行相关关系分析，结果表明（表4），不同模式林分的植物多样指数与土壤物理性状特征关系不显著，与土壤养分特征关系密切，其中，全 N 与

表4 8种模式林分群落物种多样性指数与土壤特征因子的相关系数

Table 4 the correlation coefficients of soil characteristics and species diversity index of 8 structure models of water conservation forest communities

多样性 指数	土壤特征参数											
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	X10	X11	X12
R	-0.201 3	-0.131 9	0.278 3	-0.118 7	-0.321 3	0.512 7**	0.336 1	0.637 1**	-0.260 3	0.539 8**	0.373 2	0.168 9
H	-0.357 4	-0.211 7	0.224 3	-0.286 5	0.476 2*	0.393 6*	0.172 6	0.508 6**	-0.104 1	0.452 1*	0.261 7	0.430 3*
D	-0.332 9	-0.225 1	0.235 6	-0.265 3	0.413 5*	0.412 7*	0.192 3	0.532 4**	-0.119 6	0.443 2*	0.304 9	0.420 2*
E	-0.171 9	-0.314 1	0.347 1	-0.297 4	-0.261 8	0.388 9*	0.154 5	0.611 8**	-0.092 8	0.065 1	0.182 6	0.263 8

全 K 与四个多样性指数均呈显著或极显著的正相关关系, 有机质、阳离子交换量和 Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数呈显著的正相关关系, Margalef 指数、Shannon-Wiener 指数、Simpson 指数与速效 P 呈显著的正相关关系。

进一步采用逐步回归法分析不同模式水源林群落物种多样性指数与土壤特征因子的关系, 并构建线性回归模型, 从表 5 中可以看出, 不同模式水源林物种的多样性指数与土壤特征关系显著, 尤其以土壤养分特征因子与多样性指数关系更密切, 特别是有机质和全 N 两因子在回归过程中均进入了 4 个方程中, 表明植物多样性对提高土壤养分的作用显著。

表5 8种模式林分群落物种多样性指数与土壤理化因子的多元线性回归

Table 5 The multi-factors liner regression between species diversity index and soil factors of 8 structure models of water conservation forest communities

多样性 指数	多元线性回归方程	F	R ²
R	$R = -6.23 + 0.44X_1 + 3.85X_5 + 1.14X_6 + 2.01X_{10}$	216.63	0.667
H	$H = -0.13 + 1.86X_5 - 0.013X_6 + 0.19X_8 + 2.02X_{11} + 0.08X_{12}$	18.93	0.632
D	$D = -2.47 + 0.02X_5 + 0.28X_6 + 1.01X_8 - 0.14X_{12}$	26.28	0.599
E	$E = -7.26 + 1.71X_5 + 0.82X_6 + 3.16X_{12}$	127.12	0.696

3 结论与讨论

用Margalef物种丰富度指数、Shannon-Wiener物种多样性指数、Simpson优势度指数和Pielou均匀度指数对渝北8种不同模式水源涵养林群落植物多样性分析得出, 在乔木层, 物种多样性以马尾松×广东山胡椒混交林(III)最高, 在灌木层和草本层, 物种多样性均以广东山胡椒×杉木混交林(V)最高, 三个层次的物种多样性均以毛竹纯林(IV)最低; 对群落总体物种多样性分析得出以广东山胡椒×杉木混交林(V)的物种多样性水平最高。马尾松×广东山胡椒混交林(III)次之, 两种模式林型分别为马尾松×柳杉混交林(VI)和毛竹纯林(IV)最低。罗涛^[22]等研究发现马尾松火烧迹地在群落恢复初期, 阔叶树种没有出现时群落的多样性较低, 随着阔叶树种的

出现, 群落物种多样性则随之提高。这与本研究结果相似, 说明在该地区主要选用乡土树种马尾松、广东山胡椒、杉木、四川大头茶、毛竹等构建水源涵养林, 以营造针阔混交林为主, 合理搭配这些树种, 对提高林下灌木层及草本层物种多样性水平具有重要作用, 而针叶林和纯林的物种多样性则较差。因此建议在造林时以针阔混交林为主, 对纯林进行补植阔叶树种的林分改造。

用土壤容重、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、pH值、有机质含量、全氮、全磷、全钾、速效氮、有效磷、速效钾和阳离子交换量(CEC)12个指标表征土壤的物理和养分特征, 研究表明8种模式水源涵养林地土壤理化因子呈显著或极显著差异, 土壤物理性质特征差异显著, 土壤养分特征差异达到极显著性水平。广东山胡椒×杉木混交林(V)和马尾松×广东山胡椒混交林(III)两个林型对改善林地土壤持水性和透水性方面作用显著。陈绍桢^[23]等和罗金旺^[24]研究表明, 杉木和马尾松与阔叶树种混交后, 林地的土壤物理性质和养分状况与纯林地相比得到明显改善, 林分涵养水源能力得到明显提高。结合本研究结果说明马尾松和杉木作为西南地区的主要造林树种, 用这两种树种构建水源涵养林时, 与阔叶混交能够显著提高土壤质量以及森林涵养水源的能力。

有关物种多样性指数与土壤特征的关系较为复杂, 不同学者的研究结果也不一致, Gentry^[25]认为随着土壤肥沃程度的增加, 群落的物种多样性也逐渐增加, 而肖德荣^[13]等研究认为Hannon-Wiener物种多样性指数、Simpson优势度指数与土壤有机质、全氮含量呈负相关, 王长庭^[9]等研究认为土壤容重随着物种多样性的增加而减少。而本文的结果表明不同模式林分的植物多样指数与土壤物理性状特征关系不显著, 与土壤养分特征关系密切, 这与王凯博等^[7]和左小安^[10]等的研究结果相似, 这主要是因为土壤的物理性状特征受其本身的种类、植被根系以及土壤中生物活动的影响较大, 与地面物种的丰富程度关系则不显著。而土壤养分含量的高低则会直接影响植物的生长状况。全N与全K与四个多样性指数呈显著或极显著的正相关,

Shannon-Wiener指数、Simpson指数和有机质、阳离子交换量、速效P呈显著的正相关, 特别是有机质和全N两因子与物种多样性关系最密切, 这是由于该地区属于酸雨区, 受长期酸雨沉降影响, 导致土壤中N和K离子的输入较高, 土壤的酸性较强, 阳离子交换总量较高, 作为植物生长所必需的营养元素, 所以对物种多样性影响显著; 而有机质和全N作为土壤养分中最主要的两个指标, 其含量高低直接影响土壤的肥力状况, 进而影响植物的生长发育水平及其多样性。结合他人研究结果发现植物物种多样性与土壤特征的关系在不同的区域具有一定的异质性, 这可能与不同地区环境条件如气候、土壤类型等不同有关。本研究结果表明, 不同造林模式对群落的物种多样性具有显著的影响, 同时物种多样性也影响着植物生存的土壤环境。

参考文献:

- [1] 傅伯杰. 景观生态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
FU Bojie. Landscape Ecology Principles and Applications[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [2] 阎海平, 谭笑, 孙向阳, 等. 北京西山人工林群落物种多样性的研究[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(2): 16-19.
YAN Haiping, TAN Xiao, SUN Xiangyang, et al. Studies on species diversity of plantation community on Beijing Xishan[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2001, 23(2): 16-19.
- [3] RUIZ-JAEN M C, AIDE T M. Restoration success: how is it being measured?[J]. Restoration Ecology, 2005, 13(3): 569-577.
- [4] ZERBE S, KREYER D. Introduction to special section on "ecosystem restoration and biodiversity: how to assess and measure biological diversity?"[J]. Restoration Ecology, 2006, 14(1): 103-104.
- [5] 安树青, 王峥峰, 朱学雷. 土壤因子对次生森林群落物种多样性的影响[J]. 武汉植物学研究, 1997, 15(2): 143-150.
AN Shuqing, WANG Zhengfeng, ZHU Xuelei. Effects of soil factors on species diversity in secondary forest communities[J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 1997, 15(2): 143-150.
- [6] 茹广欣, 朱登强, 王军辉, 等. 西藏色季拉山急尖长苞冷杉林地的物种多样性与土壤养分特征[J]. 河南农业大学学报, 2008, 42(5): 511-515.
RU Guangxin, ZHU Dengqiang, WANG Junhui, et al. Species diversity and soil nutrient characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* of Sejila Mountain in Tibet[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2008, 42(5): 511-515.
- [7] 王凯博, 陈美玲, 秦娟, 等. 子午岭植被自然演替中植物多样性变化及其与土壤理化性质的关系[J]. 西北植物学报, 2007, 27(10): 2089-2096.
WANG Kaibo, CHEN Meiling, QIN Juan, et al. Plant species diversity and the relation with soil properties in natural succession process in Ziwuling Area[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2007, 27(10): 2089-2096.
- [8] ANSGAR K, JORG P, VOLKER A, et al. Effects of plant diversity, community composition and environmental parameter on productivity in montane European grasslands[J]. Oecologia, 2005, 142: 606-615.
- [9] 王长庭, 曹广民, 王启兰, 等. 三江源地区不同建群期人工草地植被特征及其与土壤特征的关系[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2426-2431.
WANG Changting, CAO Guangmin, WANG Qilan, et al. Characteristics of artificial grassland plant communities with different establishment duration and the relationships with soil properties in the source region of Three Rivers in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(11): 2426-2431.
- [10] 左小安, 赵学勇, 赵哈林, 等. 科尔沁沙质草地群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 环境科学, 2007, 28(5): 945-951.
ZUO Xiaohan, ZHAO Xueyong, ZHAO Halin, et al. Changes of species diversity and productivity in relation to soil properties in Sandy Grassland in Horqin Sand Land[J]. Environmental Science, 2007, 28(5): 945-951.
- [11] 文海燕, 傅华, 赵哈林. 退化沙质草地植物群落物种多样性与土壤肥力的关系[J]. 草业科学, 2008, 10(25): 6-9.
WEN Haiyan, FU Hua, ZHAO Halin. The relationship between plant species biodiversity and soil fertility in degraded sandy grassland[J]. Pratacultural Science, 2008, 10(25): 6-9.
- [12] 刘克彪. 盐渍化沙地土壤旱化过程中植被的变化[J]. 草业科学, 2005, 22(10): 7-10.
LIU Kebiao. The change of vegetation during soil aridity in saline land[J]. Pratacultural Science, 2005, 22(10): 7-10.
- [13] 肖德荣, 田昆, 张利权. 滇西北高原纳帕海湿地植物多样性与土壤肥力的关系[J]. 生态学报, 2008, 28(7): 3116-3124.
XIAO Derong, TIAN Kun, ZHANG Liquan. Relationship between plant diversity and soil fertility in Napahai wetland of Northwestern Yunnan Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3116-3124.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化性质分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Physical and Chemical Analysis of Soil Shanghai[M]. Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [15] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准-森林土壤分析方法[M]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
State Forestry Administration, People's Republic of China. Forestry industrial standards of People's Republic of China -Forest Soil Analysis Methods[M]. Beijing: Standards Press of China, 2000.
- [16] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 91-92.
ZHANG Jiaen. A Common Experimental Study of Methods and Techniques on Ecology[M]. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2006: 91-92.
- [17] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHANG Jintun. Quantitative Ecology[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [18] 黄运菲. 马尾松混交林持水性能的研究[J]. 江西林业科技, 2006, (1): 21-23, 39.
HUANG Yunfei. Study on water retention ability of *Pinus massoniana* mixed forests[J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2006, (1): 21-23, 39.
- [19] 王占军, 蒋齐, 潘占兵, 等. 宁夏毛乌素沙地不同密度柠条林对土壤结构及植物群落特征的影响[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 123-125.
WANG Zhanjun, JIANG Qi, PAN Zhanbing, et al. Effect of plantation density of Caragana on soil properties and plant community characteristics in Ningxia Maowusu Sandy Land[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 123-125.
- [20] 李德生, 张萍, 张水龙, 等. 黄前库区森林地表径流移动规律的研究[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 78-81.

- LI Desheng, ZHANG Ping, ZHANG Shuilong, et al. Study on forest surface runoff moving law in Huangqian Reservoir Area[J]. Journal of Soil Water Conservation, 2004, 18(1): 78-81.
- [21] 李生宝, 王占军, 王月玲, 等. 宁南山区不同生态恢复措施对土壤环境效应影响的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 20-22.
- LI Shengbao, WANG Zhanjun, WANG Yueling, et al. Effect of different ecological restoration measures on soil environment in Ningnan Hilly Area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(4): 20-22.
- [22] 罗涛, 何平, 张志勇, 等. 渝西地区火烧迹地不同植被恢复方式下的物种多样性动态[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(6): 118-123.
- LUO Tao, HE Ping, ZHANG Zhiyong, et al. Dynamics of species diversity of burn blanks under different restoration ways in Western Chongqing[J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2007, 29(6): 118-123.
- [23] 陈绍栓. 杉木细柄阿丁枫混交林涵养水源功能和土壤肥力的研究[J]. 生态学报, 2002, 22(6): 957-961.
- CHENG Shaoshuan. The water holding capacity and soil fertility in the mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Altingia gracilides*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(6): 957-961.
- [24] 罗金旺. 马尾松与几种阔叶树混交后水源涵养功能的变化[J]. 防护林科技, 2006, 11(6): 12-14.
- LUO Jinwang. Water conservation functions of mixed plantations among *Pinus massoniana* and Broad-leaved Trees[J]. Protection Forest Science and Technology, 2006, 11(6): 12-14.
- [25] GENTRY A H. Endemism in Tropical vs. Temperate Plant Communities in Soule[M]. Sunderland, Massachusetts: Conservation Biology, Sinauer Press, 1986: 153-181.

Plant biodiversity of different water conservation forest models and their relationship with soil properties in northern water source area of Chongqing city, southwestern China

ZHAO Yangyi¹, WANG Yujie^{1*}, WANG Yunqi, ZHAO Zhanjun¹, LIU Nan¹, CHEN Lin²

1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University//Key Lab. Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry Education, Beijing 100083, China;

2. Chongqing Jinyunshan National Nature Protection Region Management Bureau, Chongqing 400700, China

Abstract: In Jinyun Mountain, Chongqing city, water conservation forest and woodland soil of eight forest models were taken as study objects. Plant biodiversity of water conservation forest models and their relationship with soil properties were studied. The species diversity of eight forest communities were expressed with diversity index (Shannon-Wiener index, Simpson index), evenness index (Pielou index) and richness index (Margalef index). Twelve soil indicators were selected to describe soil physical properties and nutrient characteristics, including soil bulk density, capillary pore, non-capillary pore, organic matter, active acid (pH), total N, total P, total K, available N, available P, available K and soil cation exchange capacity (CEC). The results showed that the species diversity of *Lindera kwangtungensis*×*Cunninghamia anceolata* mixed forest was the highest, followed by *Pinus massoniana*×*Lindera kwangtungensis* mixed forest, and *Phyllostachys pubescens* forest was the worst. There are significant difference of soil characteristics in each forest model forest. The soil quality of *Phyllostachys pubescens* pure forest was the poorest. Conifer-broadleaved mixed forest play a significant role in improving species diversity and soil quality, however, the effect of coniferous forest and pure forest was poor. Correlation analysis of species diversity index and soil characteristics factor showed that plant diversity indices of different water conservation forest modes related to soil characteristics of communities, significantly to soil nutrient characteristics, but not obvious to soil physical properties characteristics. Total N and total K have significant or quite significant positive correlation to all four full-diversity indices. Organic matter, CEC and available P significant positively correlated to Shannon-Wiener index and Simpson index. Organic matter and total N, had the closest relationship with species diversity.

Key words: northern Chongqing; water conservation forests; forest model; species diversity; soil characteristics