

岷江上游景观格局及生态水文特征分析

李崇巍^{1,2}, 刘世荣^{2*}, 孙鹏森², 葛剑平¹

(1. 北京师范大学生命科学学院, 北京 100875; 2. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091)

摘要:基于 1994 年岷江上游 TM 遥感影像分类, 结合 6 个不同集水区 1992、1993、1995 年植被生长季降雨、径流及同期 NOAA/AVHRR 的 *NDVI* 数据, 构建了植被保水指数作为表征植被生态水文功能分析的指标。并用此对岷江上游 6 个不同集水区景观格局与生态水文特征进行分析。结果表明: 不同集水区植被组成及景观结构有显著差异; 不同集水区植被保蓄降雨能力即保水指数有明显差异; 不同集水区景观结构指数与保水指数之间具有很高相关性, 其中边界密度、多样性指数与保水指数呈负相关, 聚集度指数与保水指数呈正相关。保水指数的构建对植被建设具有一定的科学意义。

关键词:岷江上游; 景观格局; 保水指数; 降雨; 径流

Analysis on landscape pattern and eco-hydrological characteristics at the upstream of Minjiang River

LI Chong-Wei^{1,2}, LIU Shi-Rong^{2*}, SUN Peng-Sen², GE Jian-Ping¹ (1. College of Life Sciences, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China; 2. Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(4): 691~698.

Abstract: The relationships among vegetation, precipitation and runoff are important issues in eco-hydrological study. There have been a lot of researches working on eco-hydrological function of forest at small scale of a catchments or an ecosystem, while less effort is made at large scale of a landscape or watershed. At the same time, there are few studies addressing the relationship between landscape indices and ecological functions, which indicates potential interaction of landscape patterns and landscape processes. The upstream of Minjiang River is situated at the south-east edge of Tibetan sub-Alpine and the topography is characterized with deep valley and steep slop. The complicated landscape patterns resulted from land use and land cover change might create different eco-hydrological functions at the upstream of Minjiang River. The study pursues two objectives: (1) to characterize vegetation and landscape patterns, to analyze dynamics of the precipitation, runoff and *NDVI* in the different catchments at the upstream of Minjiang River; (2) to explore the eco-hydrological responses of the targeted catchments to the corresponding landscape pattern, which infers landscape pattern-function relationship.

Based on the three scenes of Landsat 5 Thematic Mapper (TM) satellite images acquired on June 26, 1994, which include path 130 rows 37~39. Twelve land cover types were identified by the supervised classification techniques. With the reference to the global position system (GPS) points and GIS coverage for vegetation (1:1,000,000) acquired from the Institute of Botany, Chinese Academy of Science. Landscape pattern was analyzed by the software FRAGSTATS. The precipitation, runoff and *NDVI* data of different catchments were accumulated from April to September in the year of 1992, 1993 and 1995. Spatial surfaces for monthly precipitation were produced based on 51-gauged precipitation points by the thin plate smoothing spline techniques. The precipitation statistic data in the different catchments were made by ARCVIEW. A new eco-

基金项目:国家科技部重大基础研究计划资助项目(2002CB111504); 杰出青年基金资助项目(30125036); 国家自然科学基金资助项目(30471383)

收稿日期:2004-10-27; **修订日期:**2005-01-18

作者简介:李崇巍(1972~), 男, 新疆人, 博士生, 主要从事植被生态学、景观生态学研究。

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: liusr@forestry.ac.cn

Foundation item: China National Major Fundamental Science Program (No. G2002CB111504), the Outstanding Young Scientist Program of National Natural Science Foundation of China (No. 30125036) and National Natural Science Foundation of China (No. 30471383)

Received date:2004-10-27; **Accepted date:**2005-01-18

Biography: LI Chong-Wei, Ph. D. candidate, mainly engaged in plant ecology and landscape ecology.

hydrological index, which is expressed by the difference between precipitation and runoff divided by the product of precipitation and *NDVI*, was used in this research to represent the eco-hydrological functions of different catchments.

The results are as following: (1) the selected 6 catchments at the upstream of Minjiang River were different in landscape patterns in terms of landscape type and cover. There were higher contagion, lower edge density and diversity index in the Shouxi catchments, and lower contagion, higher edge density and diversity index in the Zagunao catchments. (2) Eco-hydrological indexes had remarkable differences among different catchments. The highest eco-hydrological index was found in the Shouxi catchments, indicating higher precipitation holding capacity of vegetation therein, while the lower eco-hydrological index was found in the Zagunao catchments, indicating its lower precipitation holding capacity of vegetation. (3) High correlation was detected between the landscape indexes and eco-hydrological indexes. Eco-hydrological index was positively correlated with landscape contagion in contrast with the negative correlation with landscape diversity and edge density.

Key words: precipitation; runoff; landscape pattern; eco-hydrological index

文章编号:1000-0933(2005)04-0691-08 中图分类号:Q948,S718.5 文献标识码:A

植被与降雨、径流的关系一直是生态水文学关注的焦点之一^[1~3]。前人对森林植被生态水文功能进行过大量研究,对森林覆被率与径流之间关系也进行过不少争论。但多局限于小尺度范围,而对一个较大尺度的集水区来说,从景观生态学角度探讨集水区生态水文功能研究较少^[4]。植被格局变化的重要环境效应之一是以水文效应的形式出现的,不同的植被格局对流域的水文效应产生不同的影响和作用。仅考虑单一植被的影响和作用是不全面的,应将集区内不同植被组成及空间分布格局考虑在内^[5]。

景观指数是指能高度浓缩景观格局信息,反映结构组成和空间配置某些方面特征的简单定量指标,其特征可以在斑块、类型和景观 3 个层次上分析^[6]。但对景观指标的实际意义和价值还存在争议,并且过去景观格局分析多侧重于结构分析,对格局指标的生态学意义研究还不够^[7,8]。归一化植被指数(*NDVI*, Normalized difference vegetation index)是点像元内的植被、土壤、大气、水分等多因子作用形成的综合反射,*NDVI* 作为一个生态功能性指标,其与植被、环境之间的关系已有大量研究^[9~11]。但如何将景观格局、降雨、径流及 *NDVI* 有机结合起来,对大尺度范围的集水区植被景观格局及其生态水文功能关系进行综合分析还需要进一步研究。

植被格局分布研究是建立在对研究区植被分布准确判别的基础的,常用的中国植被分类主要基于群落综合特征进行分类,即根据群落的生态外貌、区系组成和生境特征进行群落分类^[12]。此分类系统能全面细致反映植被分布特征,但进行一次植被普查要耗费大量人力物力,在大尺度上很难及时迅速对植被分布进行监测。遥感和 GIS 技术的发展,为在大尺度上及时进行土地覆被监测提供了可能。目前遥感分类主要有两套系统:土地利用/土地覆被,土地利用分类标准侧重于土地的“社会经济属性”,土地覆被分类标准侧重于土地的“自然属性”^[13]。地表土地覆盖类型的空间分布及其动态变化在地球系统生物、物理和化学循环过程中具有重要的作用^[14]。土地覆被标准将森林进一步划分为针叶林、阔叶林和混交林,便于研究植被生态过程,因此研究植被的生态水文功能时,选用土地覆被分类标准较为适宜。岷江上游地区作为长江上游一个重要的发源地,对其土地利用/土地覆盖空间分布及动态变化的研究已有较多报道^[15,16],但所采用的分类系统侧重于土地利用,无法较深入反映植被的自然属性。岷江上游自然植被分布面积较大,采用土地覆被标准对其进行研究具有重要意义。

本研究以四川省岷江上游为例,以 1994 年 TM 遥感影像为基础,参考 IGBP 分类标准对岷江上游土地覆被类型进行划分^[17]。并结合依据水文站点划分的不同集水区的景观格局进行分析,及各流域内降雨插值和径流深及 *NDVI* 数据,探讨不同流域内的景观格局及其生态水文特征,为揭示景观格局和过程耦合关系奠定了基础。

1 研究背景及方法

1.1 研究区概况

岷江上游地处四川盆地丘陵山地向川西北高原的过渡地带,属青藏高原东缘高山峡谷区。区域位置在北纬 30°45′~33°09′,东经 102°35′~103°56′之间,包括都江堰区首以上松潘、黑水、理县的全部以及汶川、茂县的部分地区,流域干流全长 337km,面积约为 2.2 万 km²。1 月份平均气温 -4.3℃,7 月份平均气温 14.5℃,年平均降水量 730~850 mm,水分条件好,在长江水源保护中具有重要地位。岷江流域上游植被与土壤形成与发育复杂多样,沿高程有明显的垂直地带性,由下至上具有亚热带、温带、亚高山和高山寒带等多样化气候。其植被分区上属于泛北极植物区中国喜马拉雅植物亚区横断山脉地区的一部分,植被垂直带分布明显,表现出明显的温性森林、干旱河谷灌丛、亚高山森林、亚高山草甸、灌丛等生态类型^[18]。

1.2 数据来源

本研究基于 1994 年 6 月三景 TM 影像,轨道号为 130~37,130~38,130~39。辅助解译数据为 1:100 万中国植被图^[1]、

1990年TM遥感解译土地利用图、1:10万地形图;降雨数据主要依据四川省水文水资源局提供的雨量站资料,岷江流域上游及周边地区的雨量站共计51个,时间为1992年、1993年、1995年植被生长季4~9月份,共18个月的月累计降水量(简称月降水量);径流数据为四川省水文水资源局提供的岷江流域内6个水文站月径流数据(图1)。选取于降雨同期的18个月的月累计径流量;归一化植被指数(NDVI)由美国的USGS/EROS的数据中心NOAA/AVHRR所提供,其空间分辨率为1km²,时间分辨率为月,选取时间序列为1992、1993、1995年4~9月(1994年数据缺省),共18个月NDVI数据,利用MVC法(Maximum Value Composites)消除来自云和大气的一部分干扰。2003、2004年7月两次对岷江上游野外踏查GPS数据(图1)。

1.3 研究方法

首先利用1:10万地形图,并结合水文站点位置,生成流域边界及不同水文站点对应的6个子集水区:镇江关流域、黑水流域上段、黑水流域下段、杂谷脑流域上段、杂谷脑流域下段、寿溪流域(图1)。利用地形图生成30m分辨率DEM。在ERDAS下对遥感影像进行几何精校正、图像处理、边缘增强等一系列处理,结合辅助解译数据^[12]和GPS实地考察定点及已知的地物,建立训练样本对影像进行监督分类,依据IGBP分类标准将岷江上游划分为针叶林、阔叶林、混交林、郁闭灌丛、稀疏灌草丛、草地、高山草地、农田、城镇及建筑、冰雪、裸地、水体等12类^[17]。根据野外考查GPS数据和辅助图鉴,每种类型随机选取50个样点,进行精度评价,经检验准确率达83.1%。

利用景观指数分析软件Fragstats,从景观水平上分析岷江流域6个集水区内的景观格局。在参考有关文献基础上^[7~9],主要选取以下指数:斑块密度(PD)、总边界密度(ED)、面积加权平均斑块分维指数(FD)多样性指数(H)、优势度(D)均匀度(E)、聚集度(CON)等8个指数^[6],这些指标分别主要反映了景观破碎化程度、景观多样性及景观连通性;岷江上游18个月的降雨空间分布主要采用空间插值法,降雨数据基于四川省水文水资源局提供的岷江流域上游及周边地区的51个雨量站的月降水量,降雨插值在澳大利亚国立大学资源和环境研究中心研发的AUNSPLIN(ver. 4.1)支持下完成^[19]。各集水区各月降水数据经ARCVIEW统计后进行分析;径流数据基于四川省水文水资源局提供的岷江流域内6个水文站月累计径流量(图1)。依据各集水区月径流量推算各集水区的月径流深:

$$R = \frac{T \times \bar{Q}}{1000F}$$

式中, \bar{Q} 为T时段的平均流量(m²/s),F为流域面积(km²),R为径流深(mm)。将岷江上游集水区边界与各月的NDVI空间分布图叠加,在ARCVIEW统计后导出6个集水区各月的NDVI值。

岷江上游不同集水区水文功能是不同的,本研究将各集水区对降水截蓄量程度用各集水区降雨量(P)与径流深(R)的差值来表述,并将该差值称为各集水区的保水量。各集水区的保水量与降雨量比值(P-R)/P(保水率)反映了各集水区对该区降雨的蓄留功能大小,该指标可间接反映出各集水区水文功能的不同。NDVI被认为是监测地区植被和生态环境变化的有效指标,研究表明NDVI不仅与植被生长状况密切相关,在较长时间尺度上还与区域降雨量变化相关^[11,12,20]。为此本文提出一个新水文生态指标。将植被生长季(4~9月份)各集水区保水率与生长季NDVI均值之比称为保水指数(H):

$$H = \frac{\sum_{i=4}^9 (p_i - R_i)}{\sum_{i=4}^9 p_i \times \sum_{i=4}^9 NDVI}$$

式中, P_i 为月降水量(mm), R_i 为月径流深(mm);从公式表述可以清楚地看出该指数反映了在植被生长季各集水区的植被保蓄降雨的能力。

2 结果与分析

2.1 岷江上游不同集水区植被组成分析

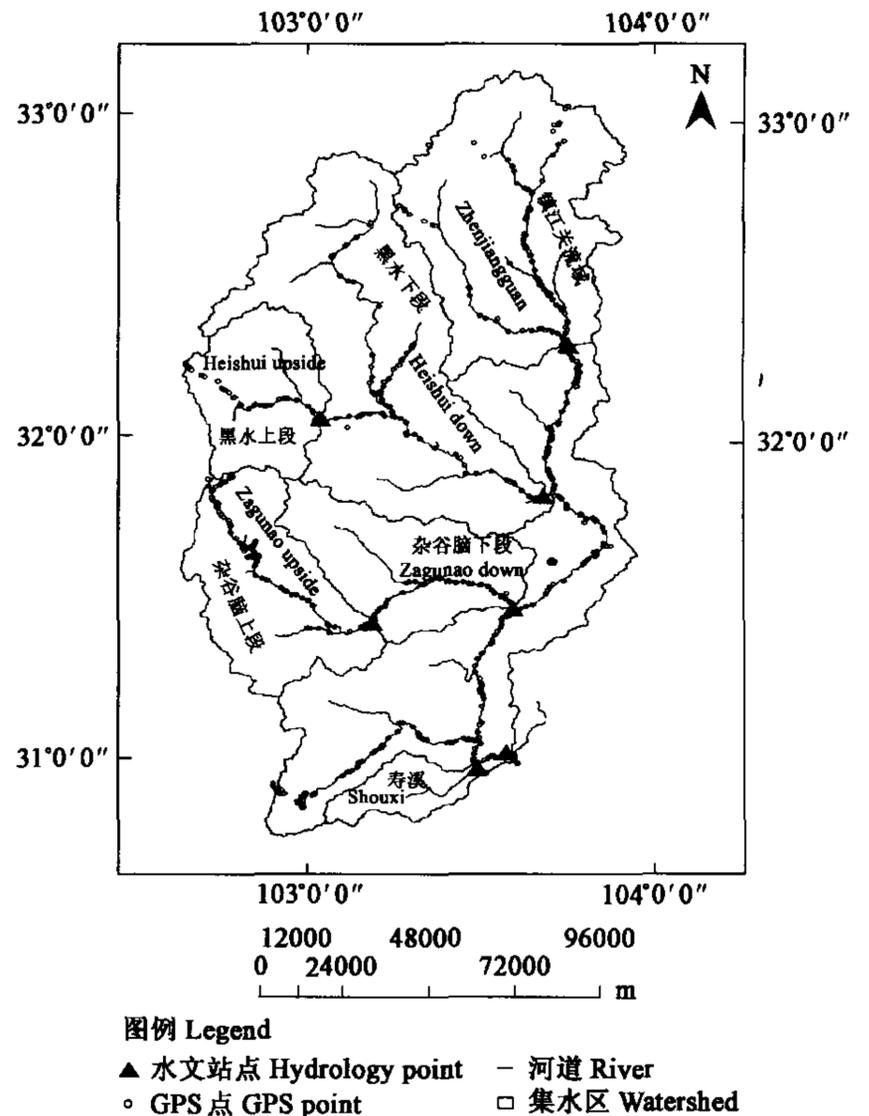


图1 集水区的划分及调查GPS点的分布

Fig. 1 Position of watershed and the distribution of GPS point

据分类结果,不同集水区植被组成有较大差异(表 1)。镇江关集水区草地(草地和高山草地)面积最大,达 52.06%;寿溪集水区森林(针叶林、阔叶林、混交林)面积最大,合计达为 89.41%;黑水集水区主要以灌丛和草地面积占优,其中黑水下段集水区草地面积比例更高;杂谷脑集水区灌丛和森林面积占优,其中杂谷脑下段集水区森林面积比例更高。

表 1 岷江上游不同集水区土地覆被分布格局

Table 1 The different land cover in different catchments of the upstream of Minjiang River

土地覆被 Land cover	镇江关		黑水上段		黑水下段		杂谷脑上段		杂谷脑下段		寿溪 Shouxi (km ²)
	Zhenjiangguan (km ²)	(%)	Heishui upside (km ²)	(%)	Heishui down (km ²)	(%)	Zagunao upside (km ²)	(%)	Zagunao down (km ²)	(%)	
针叶林 Confier	580.79	13.00	119.82	7.00	728.78	13.34	299.95	12.23	407.09	19.06	118.89
阔叶林 Broad leaf	3.39	0.08	4.59	0.27	30.78	0.56	13.74	0.56	21.80	1.02	417.23
混交林 Mixed forest	178.34	6.23	121.00	7.07	430.33	7.88	237.65	6.69	259.18	12.13	1.00
郁闭灌丛 Closed shrublands	922.15	20.64	571.73	33.38	1540.46	28.19	793.19	32.33	605.18	28.33	18.35
稀疏灌草丛 Open shrublands	32.64	0.73	97.76	5.71	288.40	5.28	197.96	8.07	154.61	7.24	7.27
草地 Grasslands	1970.46	44.11	372.98	21.78	1735.45	31.76	271.28	11.06	240.59	11.26	0.61
高山草地 Medi w grasslands	355.27	7.95	303.00	17.69	399.36	7.31	336.83	13.73	303.65	14.22	32.00
农田 Farm	138.71	3.10	28.90	1.69	204.20	3.74	22.79	0.93	62.68	2.93	0.57
城镇及建筑 Urban and build-up	14.42	0.32	2.51	0.15	17.94	0.33	4.28	0.17	9.73	0.46*	0.00
冰雪 Snow and ice	25.73	0.58	40.21	2.35	15.25	0.28	86.60	3.53	19.48	0.91	0.11
裸地 Barren	138.82	3.11	44.22	2.58	56.21	1.03	142.15	5.79	44.45	2.08	3.98
水体 Water bodies	6.80	0.15	5.93	0.35	16.46	0.30	46.92	1.91	7.46	0.35	0.73
合计 Sum	4467.51	100	1712.66		5463.61	100	2453.33	100	2135.88	100	600.75

据分类结果,不同集水区植被组成有较大差异(表 1)。镇江关集水区草地(草地和高山草地)面积最大,达 52.06%;寿溪集水区森林(针叶林、阔叶林、混交林)面积最大,合计为 89.41%;黑水集水区主要以灌丛和草地面积占优,其中黑水下段集水区草地面积比例更高;杂谷脑集水区灌丛和森林面积占优,其中杂谷脑下段集水区森林面积比例更高。

2.2 岷江上游不同集水区景观格局分析

景观破碎化描述常用斑块数和边界密度指标进行描述。斑块密度可以反映景观斑块破碎化程度,斑块密度越大,表示单位面积上斑块数多,反之,则斑块数少。边界密度是景观类型周长与类型面积的比例,可以反映一个景观类型单位面积所拥有的周长。边界密度值越大说明该景观类型被边界切割的程度越高或较为破碎。寿溪斑块数和边界密度最低(表 2),分别为 13.526 和 83.628。杂谷脑流域较高,如流域下端分别为 27.061 和 148.553。说明寿溪景观破碎程度最低,而杂谷脑流域的景观破碎度较高;分形数代表斑块的自相似性程度,分形数趋近于 1,斑块自相似性越强,斑块形状越有规律。从分形数指标看,各集水区差异不大,说明各集水区斑块形状较有规律;景观的连接性常选用聚集度指标,聚集度反映景观中不同斑块类型的聚集程度,当景观以少数大斑块组成或同一类型斑块高度连接时,其聚集度的值较大。与多样性和均匀度指标不同,聚集度指数明确考虑了斑块类型间的相邻关系,因此能够反映景观组分的空间配置特征^[7]。从该指标看寿溪集水区和镇江关集水区景观连接度较高;景观多样性指标基于信息论的基础之上,用来度量系统结构组成的复杂程度。通常随着多样性指数的增加,景观结构组成的复杂性也趋于增加。优势度指标说明类型间面积越接近,优势度值越低,通常较大的优势度值对应于一个或少数几个斑块类型占主导地位的景观;景观均匀度描述景观中各组分的分配均匀程度,其值越大表明景观各组分成分分配越均匀。均匀度的变化趋势与优势度相反,反映景观各斑块在面积分布的不均匀性,均匀度和优势度指标对类型数的变化不敏感^[9];综合以上几个指标来看,杂谷脑流域景观结构复杂性较高,景观各组成成分分配均匀,无明显占主导类型的景观斑块。而寿溪和镇江关有占主导类型的景观斑块类型(阔叶林,草地比例较高),斑块分布不均匀,景观结构复杂性较低(表 2)。

总之,从景观指数分析来看,各集水区景观差异性较大,景观破碎度、连接性和多样性有显著差异,其中寿溪集水区景观破碎化程度低,景观连接度高,景观多样性低。

2.3 岷江上游不同流域生态水文特征分析

研究选取 6 个集水区 1992、1993、1995 年(缺 1994 年资料)植物生长季(4~9 月份)的 NDVI、降雨、径流数据,分析了不同流域生态水文变化特点。从图 2 可见,不同集水区降雨在年、季间有显著的变化。1992 年存在 6 月(寿溪流域为 7 月份)一个明显的降雨峰值,1993 年降雨变化波动较小无明显的峰值,1995 年各流域降雨变化波动较大,5、6 月份存在一个降雨高峰,而 7、8 月份迅速变为一个降雨低谷;同一年度不同集水区间降雨也存在较大差异,镇江关流域降雨明显偏低,而寿溪、杂谷脑上段、黑水上段降雨偏高。不同集水区径流同降雨有相似特征,年季间径流量随降雨量波动,但波动较为平缓,说明存在一定滞后性,如 1995 年径流无明显的波谷。NDVI 主要反映植被生长状况,从图中可见在较短时间尺度上其与降雨和径流并无明显的联系,并

未随降雨和径流波动而发生改变,在生长季保持上升趋势,8月份达到峰值,9月份略有下降。寿河流域 *NDVI* 值在9月份有显著下降,说明在该流域植被与其它流域有显著的不同,这是由于阔叶林在该流域占很高的比例,9月份部分植被的落叶造成了该流域 *NDVI* 值的迅速下降。总之 *NDVI* 的变化特征较好的反映了不同流域植被生长状况。

表 2 岷江上游不同集水区景观格局

Table 2 Landscape pattern in different catchments of the upstream of Minjiang River

集水区 Watershed	景观指数 Landscape index						
	斑块数 Patch density	边界密度 ED Edge density	分形数 Fractal index	聚集度 Contagion	多样性指数 Diversity index	均匀度指数 Evenness index	优势度指数 Dominance index
镇江关 Zhenjiangguan	20.094	113.185	1.069	55.578	1.647	0.642	0.838
黑水上段 Heishui upside	21.506	126.035	1.070	49.883	1.861	0.726	0.624
黑水下段 Heishui down	20.509	114.425	1.068	51.904	1.811	0.706	0.674
杂谷脑上段 Zagunao upside	26.399	145.652	1.070	44.701	2.034	0.793	0.451
杂谷脑下段 Zagunao down	27.061	148.553	1.068	45.663	1.991	0.776	0.494
寿溪 Shuoxi	13.526	83.628	1.068	71.679	0.959	0.386	1.526

经统计分析在这 3a 中 *NDVI* 与降雨、径流之间并无显著相关性,说明降雨在较短的时间尺度上,随机性较强,无明显的变动规律,而 *NDVI* 与植被生长状况紧密相关,有较明显的季节变化特征,所以 *NDVI* 并未随降雨、径流发生显著波动。

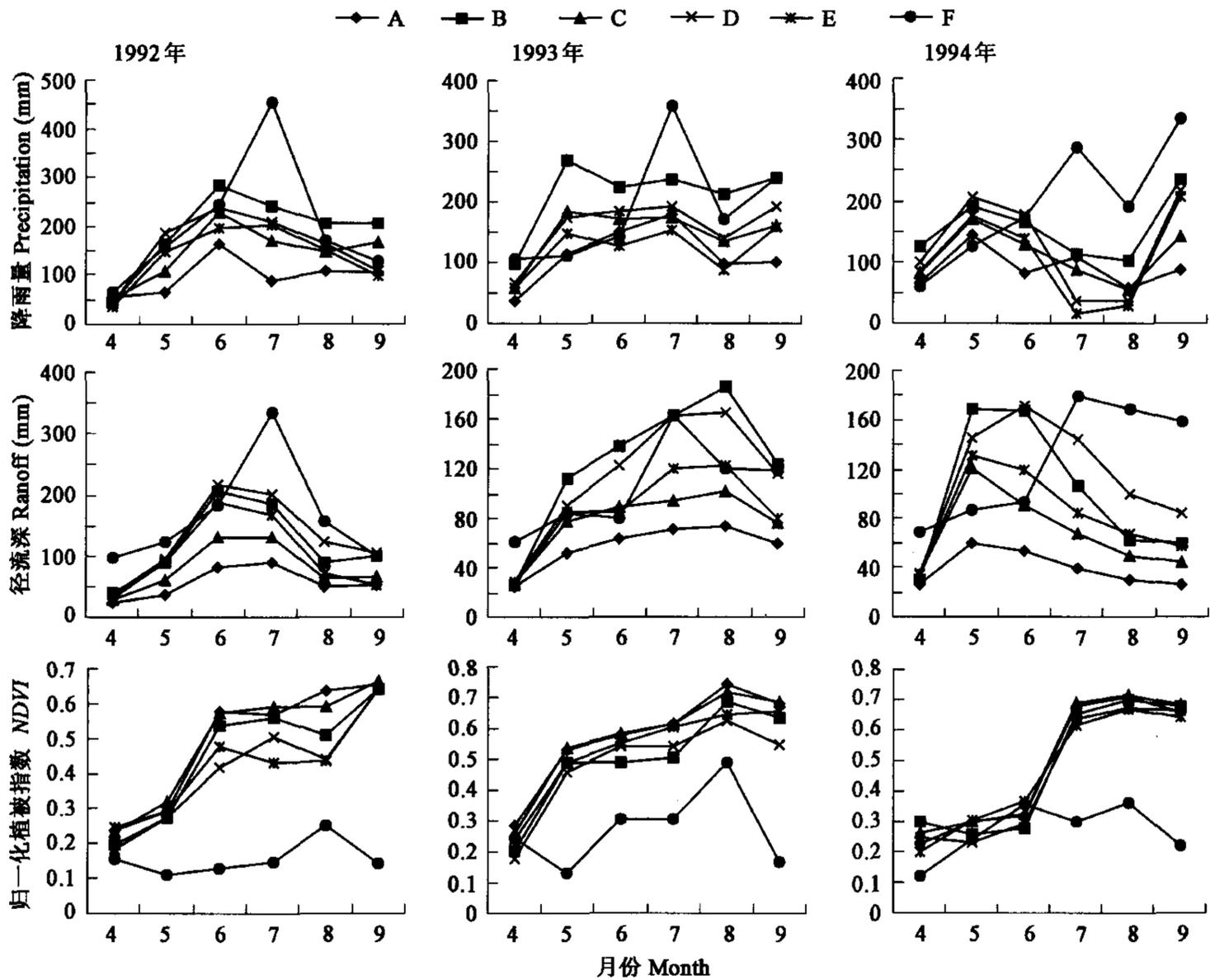


图 2 岷江上游不同集水区不同年代生长季降雨、径流、*NDVI* 变化

Fig. 2 The different precipitation, runoff and *NDVI* in the different catchments of the upstream of Minjiang River

A 镇江关流域 Zhenjiangguan; B 黑水流域上段 Heishui upside; C 黑水流域下段 Heishui down; D 杂谷脑流域上段 Zagunao upside; E 杂谷脑流域下段 Zagunao down; F 寿溪流域 Shuoxi

2.4 岷江上游不同集水区景观格局与其生态水文功能分析

岷江上游不同集水区水文功能有明显差异,依据水量平衡原理各集水区 P (降雨量) - R (径流深)主要表现为植被蒸散发和土壤蓄水,Kondo 等人将 $P - R$ 称为水分散失量,并将此变量表述为蒸散发量^[10,21]。该差值与降雨量比值即 $(P - R)/P$ (保水率)反映各集水区对该区降雨的蓄留功能大小,该指标可间接反映出各集水区水文功能的不同。为了探求各集水区水文功能

与植被生态功能之间关系,本文提出一个新水文生态指标:保水指数。将植被生长季各集水区保水率与生长几季 *NDVI* 均值之间比值 $\sum(P - R) / (\sum P * \sum NDVI)$ 称为保水指数。从公式表述可以清楚的看出该指数反映了在植被生长季各集水区的植被保蓄降雨的能力。

不同集水区对降雨蓄留率即保水率是不同的(图 3),在杂谷脑河流域保水率相对较低,镇江关集水区保水率相对较高。这是由于不同集水区植被格局及环境因素差异较大,因此反映在各集水区上水文功能上也存在显著差异。而同一集水区在不同年份保水率也是不同的,这与不同年份降雨、温度等环境变化有关。由于保水率受降雨量等环境因素影响较大,并不能完全反映不同集水区植被生态水文功能。所以本研究将不同集水区保水率与 *NDVI* 联系起来进行分析。不同集水区植被保蓄降雨能力即保水指数也是不同的(图 2),寿溪集水区保水指数明显偏高,杂谷脑流域的集水区保水指数相对较低,说明寿溪流域植被截蓄降雨的功能较高,这于寿溪集水区阔叶树占较大比例是一致的,而杂谷脑流域植被截蓄降雨的功能相对较低。是由于这两个流域植被组成和景观格局存在的很大差异(表 1,2),造成了其植被生态水文功能的差异。

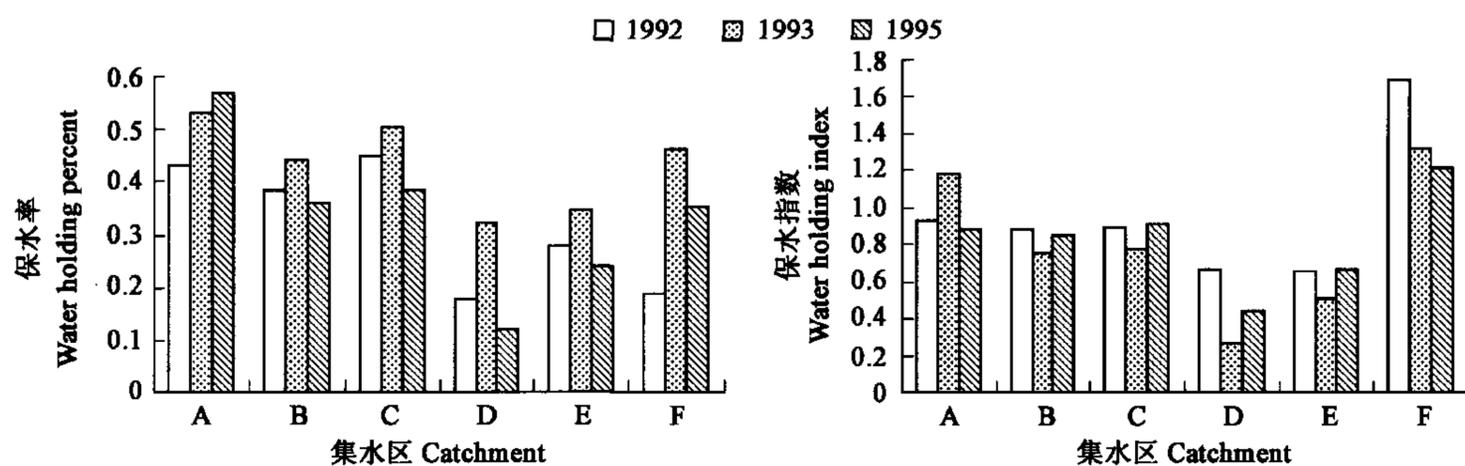


图 3 年际间不同集水区在植物生长季(4~9 月份)的保水率和保水指数

Fig. 3 Water holding percent and Water holding index in the different years from April to September in the different catchments of the upstream of Minjiang River

A 镇江关流域 Zhenjianguan; B 黑水流域上段 Heishui upside; C 黑水流域下段 Heishui down; D 杂谷脑流域上段 Zagunao upside; E 杂谷脑流域下段 Zagunao down; F 寿溪流域 Shouxi

为了探求不同集水区景观结构与生态水文功能之间的关系,本研究对六个集水区的景观指数与保水指数进行了分析。结果表明:不同流域景观格局指数与保水指数之间的存在很高的相关性(图 4)。经 Spss 统计软件进行相关分析表明,边界密度与保水指数在 1992、1993、1995 年复相关系数 R^2 分别为 0.8856 ($p < 0.05$)、0.9813 ($p < 0.01$) 和 0.8412 ($p < 0.1$),边界密度是景观破碎化程度的直接反映,边界密度越高反映景观破碎度越高。边界密度与保水指数呈负相关,杂谷脑上段集水区边界密度最高,景观破碎度高植被保水指数低,而寿溪集水区景观破碎度低植被保水指数高;聚集度指数与保水指数在 1992、1993、1995 年复相关系数 R^2 分别为 0.8997 ($p < 0.05$)、0.9841 ($p < 0.01$)、0.955 ($p < 0.01$)。聚集度指数反映了景观中不同斑块类型的聚集程度,其值越高说明植被类型间的连通性越好,进行物质能量循环程度相应较高,因此聚集度与保水指数呈正相关,寿溪集水区阔叶林比例高达 69.49%,该集水区植被聚集度高,相应保水指数也高;多样性指数与保水指数在 1992、1993、1995 年复相关系数 R^2 分别为 0.8839 ($p < 0.05$)、0.9811 ($p < 0.01$)、0.9775 ($p < 0.01$),多样性指数为景观中斑块类型在景观中出现的概率,该值大小反映了不同植被类型的丰富度及异质性。多样性指数与保水指数呈负相关,杂谷脑上段集水区多样性指数较高,说明该集水区植被类型丰富度高,景观结构组成的复杂性高,植被保蓄降水的能力较差。

3 结论与讨论

对岷江上游不同集水区植被组成和景观格局的分析表明:不同集水区植被组成有较大差异。寿溪集水区以森林植被组成占明显的优势,而镇江关流域草地(草地和高山草地)面积所占比重较大;从景观指数分析来看,各集水区景观格局不同,景观破碎度、连接性和多样性有显著差异,其中寿溪集水区景观破碎化程度低,景观连接度高,景观多样性低,杂谷脑流域景观多样性高,景观连接度较低,景观破碎化程度较高;从不同集水区 1992、1993、1995 年生长季生态水文变化特征分析,降雨、径流在年、季间变化有显著的不同,*NDVI* 的变化特征较好的反映了不同流域植被生长状况。在这 3a 中 *NDVI* 与降雨、径流之间并无显著相关性,此结论与 Richard、Szilagyi、张远东等人的研究不同^[10,21,22],可能是因为本研究的时间序列较短,而降雨在时间分布上在较短的时间尺度上,随机性较强,无明显的变动规律,*NDVI* 与植被生长状况紧密相关,有较明显的季节变化特征,所以 *NDVI* 并未随降雨、径流发生明显的波动。

本文提出一个新水文生态指标——保水指数,来描述不同集水区植被保蓄降雨的能力。研究表明:不同集水区保水指数有

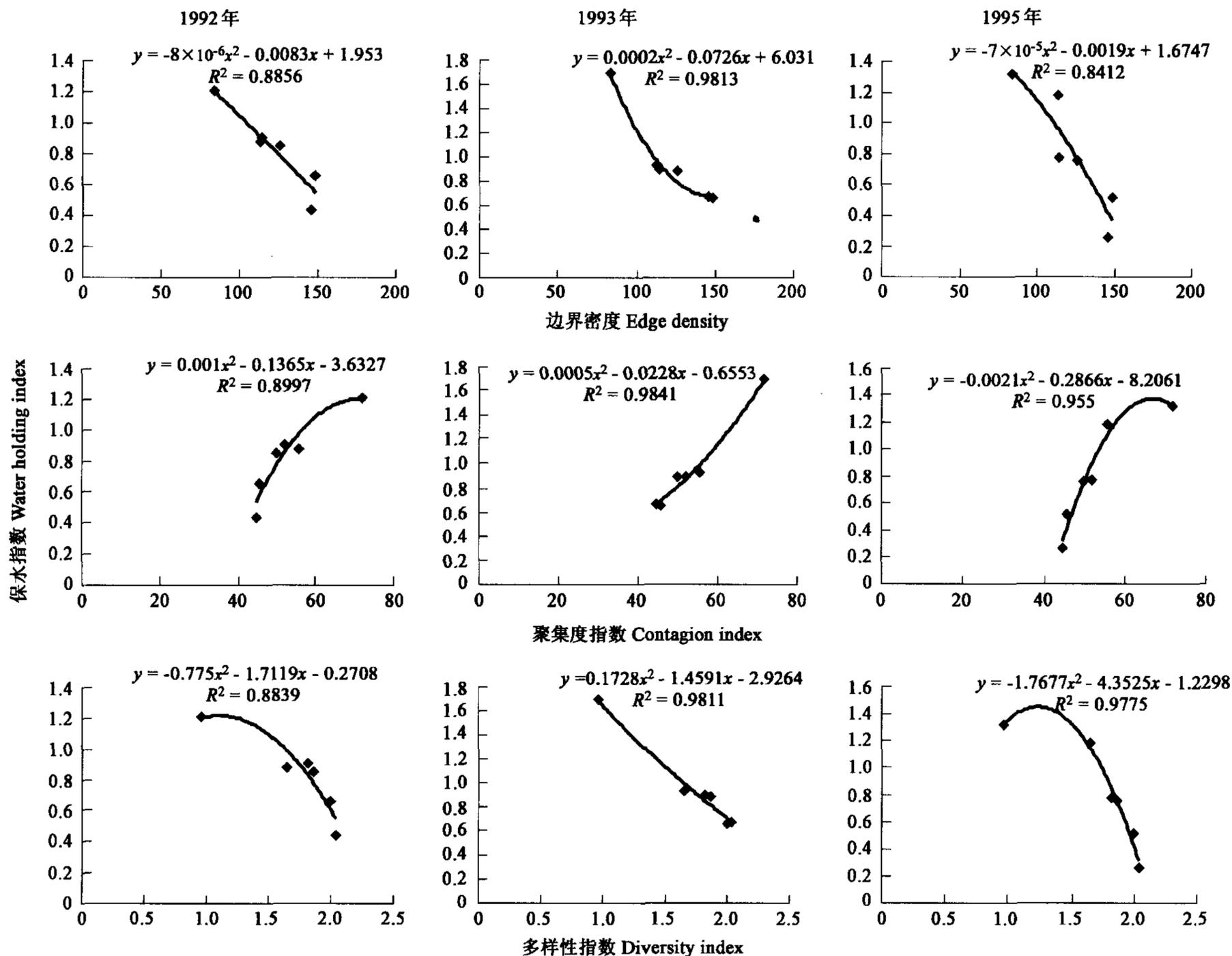


图4 保水指数与景观指数之间的关系

Fig. 4 Relationship between the water holding index and landscape index

明显差异,寿溪集水区保水指数明显偏高,说明寿溪流域植被截蓄降雨的功能较高,而杂谷脑流域的集水区保水指数相对较低,说明该流域植被截蓄降雨的功能相对较低;同时还发现,不同集水区景观结构指数与保水指数之间具有很高相关性,其中边界密度、多样性指数与保水指数呈负相关,聚集度指数与保水指数呈正相关。这说明如果集区内景观破碎化程度高,植被类型组成复杂,植被空间分布不均,连通性较差,则该集水区植被蓄留降水能力较低及保水指数也较低。

目前对景观指数的选用还存在一定的争议性^[7,8],本研究的景观结构指数的选取主要基于李秀珍等人的研究^[8],均为一些较常用指标,舍弃了一些具有争议的指标。在对保水指数与景观指标相关分析时,考虑到指标的冗余问题,文章中只列出了边界密度、聚集度指数和多样性指数这3个指数的结果,分别反映了景观破碎化程度、景观连通性及景观多样性,当然其余四个指数也同样具有很高相关性。虽然保水指数在岷江上游初步的分析是可行的,但考虑到数据的时空匹配较为困难,研究的时间选取较短(1992~1995年),无法进一步反映保水指数时间变化特征。此外研究的地点仅限于岷江上游,对其它地区是否适用,这些都还有待于进一步探讨。

森林水文学家曾对森林覆盖率变化与流域径流量变化的关系进行过多年探讨,但其研究多集中于小流域的对比实验,在较大尺度的流域上过多强调了森林植被变化所带来的生态水文功能上的改变,而对不同景观格局的生态水文功能研究较少^[6]。在较大尺度上集水区作为一个复合景观系统,如杂谷脑上段集水区森林、灌丛、草地面积比例为22.48%、32.33%、24.79%,是一个复合景观结构,作者认为探讨该集水区生态水文功能仅从森林植被的角度考虑是不够的,还需要从景观结构组成的角度加以考虑。

基于本研究的结果,在植被建设中,提高森林覆被率,增加集水区植被之间的连通性,降低集水区景观破碎度,则使集水区植被蓄留降水能力相应提高,径流量也随之会减少。反之,如果植被建设增加了景观破碎度,集水区植被蓄留降水能力会减弱,径流量则会增加。

References:

- [1] Azzali S, Menenti M. Mapping vegetation-soil-climate complexes in southern Africa using temporal Fourier analysis of NOAA-AVHRR NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(5):973~996.
- [2] Bradford D W, Breshears D D, Craig D A. Ecohydrology of resource-conserving semiarid woodland: effects of scale and disturbance. *Ecological Monographs*, 2003, **73**(2):223~239.
- [3] Zhang Z Q. *Forestry hydrology process and mechanism*. Beijing: China Environment Science Publishing House, 2003.
- [4] Liu S R, Sun P S, Wen Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**:16~22.
- [5] Liu S R, Sun P S, Wan J X, et al. Hydrological functions of forest vegetation in upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Natural Resources*, 2001, **16**(5):451~456.
- [6] Wu J G. *Landscape ecology pattern, process, scale and hierarchy*. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [7] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, **10**:235~254.
- [8] Li X Z, Bu R C, Chang Y. The response of landscape metrics against pattern scenarios. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(1):123~134.
- [9] Kondo A, Higuchi A, Kishi S, et al. The use of multi-temporal NOAA/AVHRR data to monitor surface moisture status in the huaihe river basin China. *Advances in Space Research*, 1998, **22**(5):645~654.
- [10] Richard Y, Poccard I. A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**(15):2907~2920.
- [11] Zhao Y S. *Theory and method in remote application*. Beijing: Science Publishing House, 2003.
- [12] Editorial board of vegetation map of China. *Vegetation atlas of China (1:1Million)*. Beijing: Science Press, 2001.
- [13] Shi P J, Gong P, Li X B, et al. *Methods and practice on Dynamic Change of Land Use/Cover*. Beijing: Science Press, 2000.
- [14] Sellers P J, Dickinson R E, Randall D A, et al. Modeling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 1997, **275**:502~509.
- [15] Fan H, Zhang J P. Study on Land Use/Cover in arid valley of Upper Minjiang watershed. *Journal of Desert Research*, 2002, **22**(3):273~278.
- [16] Li A N, Zhou F C, Jiang X B, et al. The analysis on the patio temporal Dynamic Change of Land Use/Cover——Taking the Upper Reaches of Minjiang River as a case. *Geography Information Science*, 2003, **8**(2):100~103.
- [17] Loveland T R, Zhu Z, Ohlen D O, et al. An analysis of the IGBP Global Land-Cover Characterization Process. *Photogram Metric Engineering and Remote Sensing*, 1999, **65**(9):1021~1032.
- [18] Zhang W H, Lu T, Zhou J Y. A floristic study on seed plants in the upper reaches of Minjiang River. *Acta Botanica Boreal-Occident Sinica*, 2003, **23**:88~89.
- [19] Sun P S, Liu S R, Li C W. Estimation of Precipitation using altitude and prevailing wind direction effect index Mountainous region. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(9):123~134.
- [20] Stoms D M, Hargrove W W. Potential NDVI as a baseline for monitoring ecosystem functioning. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**(2):401~407.
- [21] Sziliagy J. Can a vegetation index derived from remote sensing be indicative of areal transpiration?. *Ecological Modeling*, 2000, **127**:65~79.
- [22] Zhang Y D, Xu T Y, Gu X F, et al. Correlation analysis of NDVI with climate and hydrology factors in oasis and desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 2003, **27**(6):816~821.

参考文献:

- [3] 张志强. 森林水文:过程与机制. 北京:中国环境科学出版社, 2002. 1~13.
- [5] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究, 2001, **16**(5):451~456.
- [6] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级. 北京:高等教育出版社, 2000. 96~112.
- [8] 李秀珍, 布仁仓, 常禹, 等. 景观格局指标对不同景观格局的反应, 2004, **24**(1):123~134.
- [11] 赵英时. 遥感应用分析原理与方法. 北京:科学出版社, 2003. 387~399.
- [12] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中国植被图集, 1:1000 000. 北京:科学出版社, 2001. 66~67.
- [13] 史培军, 宫鹏, 李晓兵, 等. 土地利用/覆盖变化研究的方法与实践. 北京:科学出版社, 2000. 1~6.
- [15] 樊宏, 张建平. 岷江上游半干旱河谷土地利用/土地覆被研究. *中国沙漠*, 2002, **22**(3):273~278.
- [16] 李爱农, 周万村, 江晓波, 等. 土地利用与土地覆被时空动态变化分析——以岷江上游为例. *地球信息科学*, 2003, **5**(2):100~104.
- [18] 张文辉, 卢涛, 周建云, 等. 岷江上游流域种子植物区系研究. *西北植物生态学报*, 2003, **23**(6):888~894.
- [19] 孙鹏森, 刘世荣, 李崇巍. 基于地形和主风向效应模拟山区降水空间分布. *生态学报*, 2004, **24**(9):1910~1915.
- [22] 张远东, 徐应涛, 顾峰雪, 等. 荒漠绿洲 NDVI 与气候、水文因子的相关分析. *植物生态学报*, 2003, **27**(6):816~821.