

文章编号: 1008 - 2786 - (2013) 3 - 280 - 07

## 岷江上游植被覆被对水热条件的响应

张文江<sup>1</sup> 宁吉才<sup>2\*</sup> 宋克超<sup>1</sup> 黎小东<sup>1</sup> 王焱<sup>1</sup> 王欣<sup>1</sup> 覃光华<sup>1</sup>

(1. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;

2. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003)

**摘 要:** 利用 2000—2011 年间的水文气象和植被遥感等资料, 分析了该地区植被覆盖对水热条件响应的季节规律及年际变化。研究表明, 岷江上游以 2 000 ~ 3 000 m 高程带水热组合条件最好, 分布了川滇高山栎等阔叶林; 3 000 m 以上逐渐受热量制约, 植被依次为针叶林、灌木、草甸和高山植被; 2 000 m 以下受干热河谷效应及人类活动影响, 植被以灌木类为主。植被的实际“基带”位于河谷灌木带之上, 植被垂直带谱呈部分折叠对称。在植被的水分响应方面, 4 000 m 以下植被水分指数的季相规律呈夏高冬低, 同降水基本一致; 而 4 000 m 以上干旱特征明显, 夏季由于强辐射导致水分指数年内最低。此外, 过去 40 年来岷江上游气候暖干化明显, 径流系数则呈缓慢减小趋势。因此, 未来水热条件变化可能会导致岷江上游森林覆盖萎缩, 其生态和水资源供给等问题应予以重视。

**关键词:** 岷江上游; 植被; 水热条件; 响应; 水分指数; 高山峡谷

中图分类号: Q948.11

文献标志码: A

地处青藏高原向四川盆地的过渡带, 岷江上游受东南和西南季风的共同影响, 其生态系统对水热条件波动敏感。岷江流域是长江上游生态屏障的重要组成部分, 为成都平原都市圈及都江堰灌区提供了水资源。因而, 理解岷江上游的植被水热条件响应机制及其变化趋势, 对指导水源涵养功能保护和水土流失防治, 具有现实意义。

由于生态和水资源供给等方面的重要性, 岷江上游广受生态、环境、水文等多领域的关注, 并取得了一些共识。杨德伟等认为岷江流域的植被覆盖空间格局, 同海拔梯度、人口密度等相关<sup>[1]</sup>。同横断山区干热河谷的水热条件相似, 岷江上游也有干湿季之分, 部分地区缺水严重, 以致干旱年份可影响到树木生长<sup>[2]</sup>。但李崇巍等认为, 该地区植被分布与海拔、温度相关性较高, 与降雨无明显相关性<sup>[3]</sup>, 不过这有待进一步分析。刘丽娟等根据不同土地覆盖的水文分布空间格局, 证实了不同植被类型集水区

内降雨与径流间的关系紧密<sup>[4]</sup>。岷江上游山高坡陡, 土壤侵蚀的强度及空间分布, 同地表覆被类型直接相关<sup>[5]</sup>。由于干热河谷地区的干季水热条件失衡, 优势植被以中旱生为主, 覆盖率低、抗逆性差, 受干扰后恢复困难<sup>[6]</sup>。不过, 岷江上游的生态脆弱性已受到相关部门的重视, 于 1994 年起实施天然林保育工程, 对该区的水土流失、生态系统恶化的状况有所抑制, 植被景观得到了一定改善<sup>[7-8]</sup>。

但是在当前变化气候形势下, 岷江上游生态系统的水热响应特征及趋势如何? 受缺乏长时间序列资料的限制, 该地区水热条件的探讨多以某时的静态分析为主, 对植被水热条件响应的季节规律和年际波动研究, 则相对较少<sup>[1]</sup>, 仍待进一步的探讨。长时间序列的遥感观测资料, 更有助于揭示区域植被动态及环境因子响应特征。1981—2000 年间的 NOAA 植被指数序列, 显示青藏高原中东部地区植被受水热条件控制的基本空间格局<sup>[9]</sup>。但是对 15

收稿日期( Received date): 2012 - 09 - 13; 改回日期( Accepted): 2013 - 01 - 01。

基金项目( Foundation item): 国家自然科学基金青年基金项目( 40801175, 40901022, 41201214)、国防科工局民用航天项目、四川大学中央高校基本科研业务费项目。[Supported by the National Natural Science Foundation of China( 40801175, 40901022 and 41201214), the Special Fund for Basic Scientific Research of Central Colleges, Sichuan University.]

\* 通信作者( Corresponding author): 宁吉才( 1974 - ) 男, 博士, 助理研究员, 主要从事海岸带生态、山区水热环境模拟等研究。[Ning Jicai, male, Ph.D., is interested in coastal ecology, the heat and water of mountain region.]

~30 km 横向尺度的岷江上游高山峡谷, AVHRR 植被指数 8 km 的分辨率, 其精度不足。因此, 本文将利用 2000—2011 年间 500 m 分辨率的 MODIS 遥感资料序列和同期水文气象资料, 研究岷江上游地区水热条件的生态系统响应及可能趋势, 讨论当前变化气候下的水资源形势。理解植被对水热条件的响应机制, 将有助于变化气候形势下的长江上游水源涵养保护和水土流失防治。

## 1 研究区概况

岷江上游流域为岷江进入四川盆地的都江堰以上部分, 其面积约  $2.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 位于  $30^\circ 45' \sim 33^\circ 09' \text{ N}$ 、 $102^\circ 35' \sim 103^\circ 56' \text{ E}$  间, 主要流经四川省松潘、黑水、茂县、理县、汶川 5 县。年均降水 500 ~ 850 mm, 年均流量  $158 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 丰水期(6—10月)流量占全年的 75%。该地区为青藏高原东部典型高山峡谷带, 海拔从 6 190 m 下降到出山口处都江堰渠首的 740 m, 平均海拔 3 440 m(图 1)。

岷江上游属中国东部湿润季风区与青藏高寒区的过渡带, 其生态系统具有典型高山亚高山特征。人类活动的影响相对有限, 地表覆盖以自然植被为主, 森林、灌木和草甸的面积比重分别为 35.38%、40.18% 和 24.23%(见图 1)。其中, 针叶林和阔叶林分别为 24.59%、10.36%, 优势种为紫果云杉、岷江冷杉、川滇高山栎林等; 灌丛则以草原杜鹃、头花杜鹃、百里香杜鹃、绢毛蔷薇、匍匐子和窄叶鲜卑花等分布较广; 草甸属高寒草甸, 以嵩草、圆穗蓼、珠芽蓼等占优势。

## 2 资料与方法

### 2.1 数据资料

研究区地形信息 根据 30 m 分辨率的地形数据集 ASTGTM 提取。植被覆盖类型, 参考《中华人民共和国植被图集(1:100万)》(2007年, 地质出版社)。从《中国地面气候资料日值数据集》, 提取了汶川、茂县、松潘、理县、黑水、都江堰等站气象资料, 并以周边的小金、马尔康、红原等站点作参考。流域水文响应, 则参考四川省水文局提供的岷江(紫坪铺+杨柳坪)历年平均流量。植被季相规律与年际变化分析, 采用 2000—2011 年间 MODIS 的 16 d 反射率产品, 构建时间序列的植被和水分指数。同时,

对垂直样带植被分布规律的分析, 还使用了分辨率相对较高的 TM 影像(2000-07-26)。

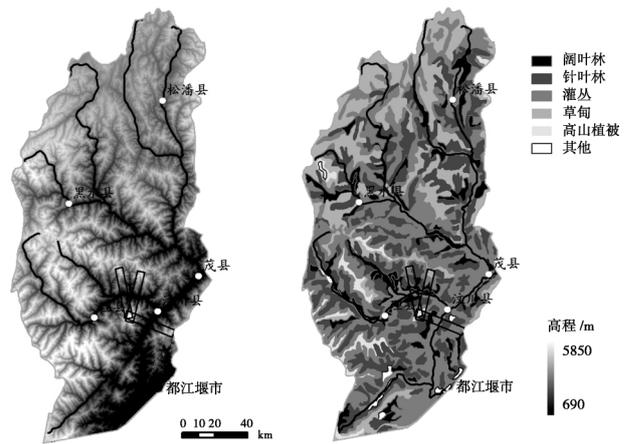


图 1 岷江上游的地形及植被覆盖(3 个小矩形条为高程样带)  
Fig. 1 The terrain and vegetation covers of the upper Minjiang Watershed

### 2.2 数据处理

岷江上游地貌类型迥异, 包括谷地、陡坡、山脊及高原等, 对地表水热条件影响显著。本文通过正负地形检验, 将研究区划分为谷地、山坡和山顶或高原 3 种类型。通过试验, 以 10 km 半径的圆为检验窗口, 将低于局部平均海拔 500 m 的区域定义为谷地, 高出 300 m 定义为山顶或高原, 其余则为山坡。并在映秀附近设置了 3 条  $2 \text{ km} \times 15 \text{ km}$  的垂直样带, 以减少基带差异, 进一步分析地势对植被分布和水热响应的影响。

岷江上游流域及周边共有 14 个气象站点, 应用泰森多边形加权计算区域降水和气温的月值及年值。分别比较雨季及全年降水和四季典型月(1、4、7、10月)的气温, 以检测研究区水热条件变化趋势。采用 500 m 的 MODIS 16 d 产品, 构建了研究区增强植被指数(EVI, Enhanced Vegetation Index), 以指示不同海拔、地貌类型的植被季节及年际变化。同时, 比较了生长旺盛期(7—8月)的 EVI 年际变化, 以揭示 2000—2011 年植被覆盖的变化趋势。基于 MODIS 遥感资料, 还构建了 2000—2011 年归一化差异水分指数(NDWI, Normalized Difference Water Index)——包含了植被和水分信息, 在一定程度上能反映植被对水热条件的响应<sup>[10-11]</sup>。此外, 为分析水热条件变化形势下流域尺度的水文响应特征, 本文还比较了研究区的径流-降水关系。

### 3 结果与分析

#### 3.1 水热条件及变化趋势

气象观测资料表明,岷江上游近几十年来气候呈暖干化趋势,同青藏高原的整体暖干化一致<sup>[9]</sup>。雨季(5—9月)和全年降水呈减少趋势,幅度约为 $-1.0\text{ mm/a}$ ;特别是过去15a的河谷地带年降水(汶川站)减少幅度超过 $10\text{ mm/a}$ ( $R^2=0.230$ , $P=0.07$ )。而研究区整体冬季气温明显升高,达到 $0.236\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ ( $R^2=0.112$ , $P=0.01$ ),高于全球平均的增温幅度( $0.20\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ )<sup>[12]</sup>;河谷地区(汶川站)的冬季增温幅度更大,达 $0.472\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ ( $R^2=0.265$ , $P<0.001$ )。研究区整体夏季增温幅度也明显,为 $0.338\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ ( $R^2=0.186$ , $P<0.005$ ),河谷夏季增温幅度仍然非常显著( $0.542\text{ }^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ , $R^2=0.442$ , $P<0.001$ )。可见,岷江上游暖干化明显,特别是河谷地带的干热化程度愈加显著。水热条件的这种变化,对不同海拔植被的影响有所不同。在高山亚高山带,变暖可一定程度改善热量条件而更有利于植被生长;但对河谷及中下坡位地带(2500 m以下),暖干化会进一步加剧水分条件的胁迫性。总体而言,水热条件的暖干化趋势,可能会降低岷江上游径流深度。

#### 3.2 植被分布及变化趋势

研究区MODIS EVI时序曲线,指示了植被的季相变化规律。首先,随着海拔升高,总体上植被指数逐渐降低,生长期逐渐缩短。但植被指数最高的地区并不是海拔最低的河谷,而是2000~3000 m海拔带。岷江上游处于青壮年期,溯源侵蚀强烈,高山峡谷多,具有不同程度的干热河谷效应,水分条件是部分河段植被生长的限制条件之一。并且,河谷地带还受一定程度的人类活动影响,植被覆盖度明显偏低。山麓地带,不仅受干热河谷效应和人类活动的共同影响,且地势陡峭、水土流失较重,植被覆盖度也较低。在中上坡位地区,热量条件的限制性已超过了水分胁迫,植被覆盖度、生长期长度主要受海拔控制,与之呈负相关。

同植被指数的空间分布格局相似,研究区植被类型也主要受水热组合控制(图2(a))。不同植被类型的EVI及生长期,从阔叶林、针叶林、灌丛、草甸和高山植被依次降低,但各类型平均海拔则不是依次升高。在海拔分布上,从下向上依次是灌木林

(平均海拔~3000 m,下同)、阔叶林(~3300 m)、针叶林(~3900 m)、高寒草甸(~4200 m)和高山植被(~4800 m)。由于干热河谷效应所致的水分胁迫,使得热量最充沛的河谷地带以灌木为主。

此外,1000~2000 m海拔带的2008—2010年植被指数明显低于2000—2007年的水平(图2(b))。2008年初南方地区发生了大范围极端低温事件,研究区多个站点在此期间观测到20年来的最低日均气温:汶川( $-2.52\text{ }^\circ\text{C}$ )、茂县( $-6.60\text{ }^\circ\text{C}$ )、理县( $-5.60\text{ }^\circ\text{C}$ )和黑水( $-5.70\text{ }^\circ\text{C}$ )。这样的极端低温,很可能对干热河谷喜热喜温植被造成了冻害。此外,2008年5月的汶川强震在1000~1600 m的山麓带诱发了大量的崩塌、滑坡<sup>[13-14]</sup>,也导致了中低海拔带的植被覆盖度有所偏低<sup>[15]</sup>。

#### 3.3 植被水分响应

岷江上游植被对水分响应的季相特征,同海拔的关系密切。低于4000 m的地区,各海拔带水分指数的年内变化趋势基本一致:夏高冬低,同降水的季节变化相似(图2(c))。水分指数在7月达到峰值,8月则明显下降,这是因为岷江上游8月降水相对较少且高温蒸散发旺盛。而海拔4000 m以上地区,其水分指数季相呈相反的趋势:夏低冬高。高海拔地区大气稀薄、太阳辐射强,生境的寒旱特征显著,在降水相对充沛的夏季也存在水分胁迫。较低覆盖度的高山植被,即是生态系统对寒旱水热条件的响应和适应。不过,冬季由于冰雪覆盖,水分指数反而相对较高。此外,高山植被覆盖度低、叶面积指数小,对降水融雪等响应敏感,并且地势陡而产流快、水土易流失,因此高山峡谷区滑坡、泥石流威胁严重,生态系统很脆弱。

不同植被类型的水分响应,基本遵循水分指数随海拔而变化的规律。森林所处地带(2500~3500 m)的水热组合条件最好,基本不受气温和降水限制,水分指数曲线同降水的季节变化最相似(见图2(a))。不过,森林生长季的水分指数年际曲线,在2008—2010年出现了明显下降。这说明,水热组合条件有可能发生了变化,导致水分指数偏低明显(图2(d))。

海拔样带的植被及水分指数,没有基带差异,更准确地反映了植被对水热条件的响应(图3)。按峰值从高到低的顺序,植被指数季相曲线的峰值前坡度逐渐变缓(图3(a)),说明生长季逐渐滞后、生长期缩短,植被类型从热带/亚热带山地植被过渡到适

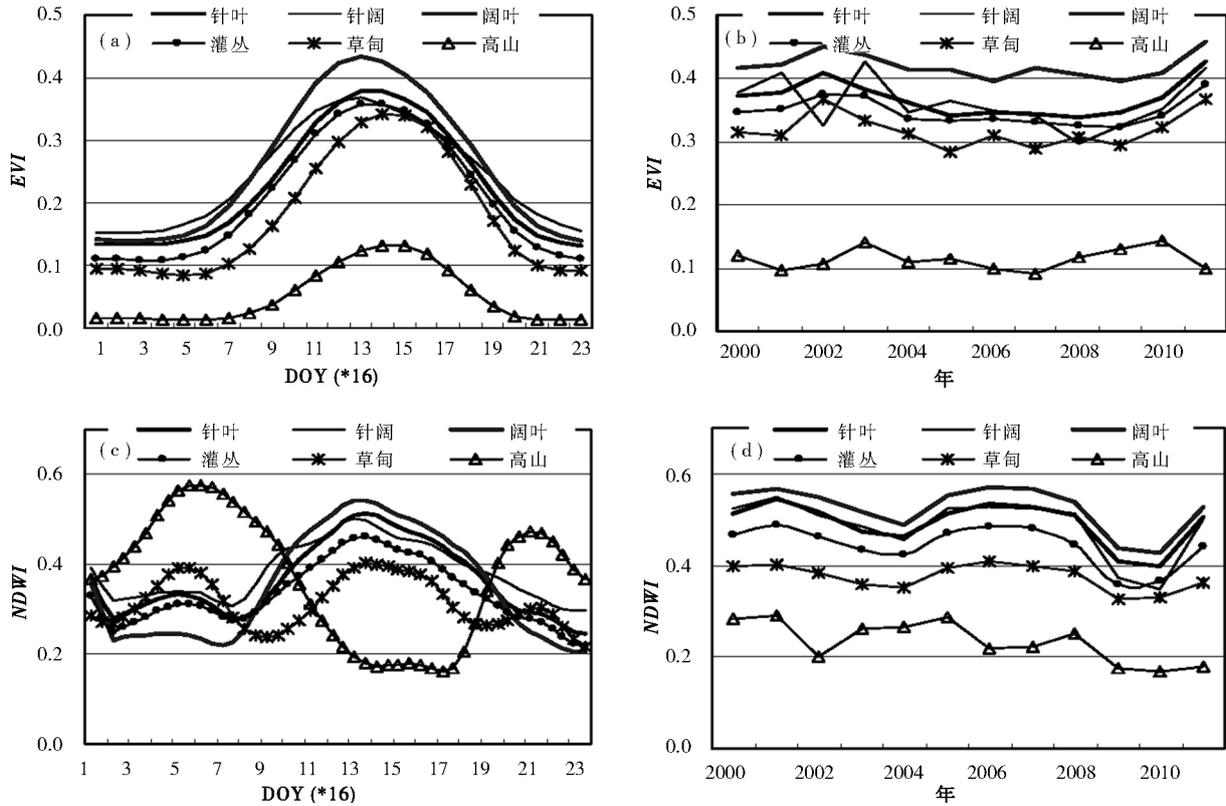


图 2 不同植被类型 EVI 和 NDWI 的季节变化(a c) 及生长季的年际变化(b d)

Fig. 2 The seasonal (a c) and annual (b d) variations of MODIS EVI and NDWI for different vegetation types

应寒旱生境的高山植被。样带在海拔 2 000 ~ 3 000 m 的植被指数最高, 对应阔叶林和针叶林, 植被条件向低海拔和高海拔都逐渐变差, 但二者变化趋势的控制原因不同。2 000 m 以下, 由于干热河谷效应, 水分亏缺致 5—10 月 EVI 水平较低( ~ 0.35), 峰值不显著, 植被以灌木为主。而在 3 000 m 以上, 随着海拔升高而热量递减, 植被逐渐过渡为灌木、草甸和高山植被。

MODIS 植被指数的空间分辨率( 500 m) 偏低, 本文进一步采用 30 m 分辨率的 TM 影像提取了垂直样带 EVI 植被指数剖面线( 图 4)。样带 EVI 剖面线, 基本指示了植被对水热条件组合的响应。热量的海拔递减规律和干热河谷效应, 在机制上共同决定 EVI 剖面线的形状。首先, 热量条件随海拔逐渐减少并在某一高度成为限制因子, 若没有水分条件限制, 则 EVI 剖面线应是一条斜率为负的近似直线。但是, 干热河谷效应的水分胁迫, 破坏了由热量条件控制的“理想”EVI 剖面斜线, 使得 EVI 剖面线在 2 800 m 以下部分, 近似同该临界高程之上的部分相对称。可见, 干热河谷效应导致岷江上游垂直基带上移, 植被带谱出现折叠对称, 带谱拐点的位置可能

取决于干热河谷效应的强度。

### 3.4 径流季节及年际变化

地处青藏高原东部的高山峡谷区, 岷江上游流域平均坡度高达 29°, 特别是松潘以下地势更陡, 属青壮年期的主河道平均比降接近 1%。尽管植被覆盖整体较好, 地势陡峭使得岷江上游水文响应敏感。过去近 40 a 的水文和气象资料显示, 该地区旬尺度的流量和降水相关系数高达 0.932 (  $P < 0.0001$  ), 径流对降水的响应略有滞后( 图 5)。受降水控制, 多年平均的出口断面( 都江堰) 旬流量在 7 月末达到峰值, 然后在 8 月降到 5 月末水平, 并维持至 10 月初后再继续回落。

研究区年径流系数达 0.86, 汛期为 0.75。曾超等计算 1982—1987 年岷江上游地区的平均径流系数为 0.77, 从上游( 镇江关以上) 的 0.55 递增至中下游( 姜射坝以下) 的 0.88<sup>[16]</sup>。岷江上游过去 40 a 的汛期径流系数, 随降水减少而呈降低趋势, 斜率为 -0.0004 (  $R^2 = 0.239, P = 0.05$  )。尤其是过去 20 a, 气候暖干化导致径流减少: 年均流量( 149.21 m<sup>3</sup>/s) 以每年 0.76 m<sup>3</sup>/s 的幅度减少, 而 7—9 月流量( 840.11 m<sup>3</sup>/s) 减少幅度达每年 6.19 m<sup>3</sup>/s。随暖

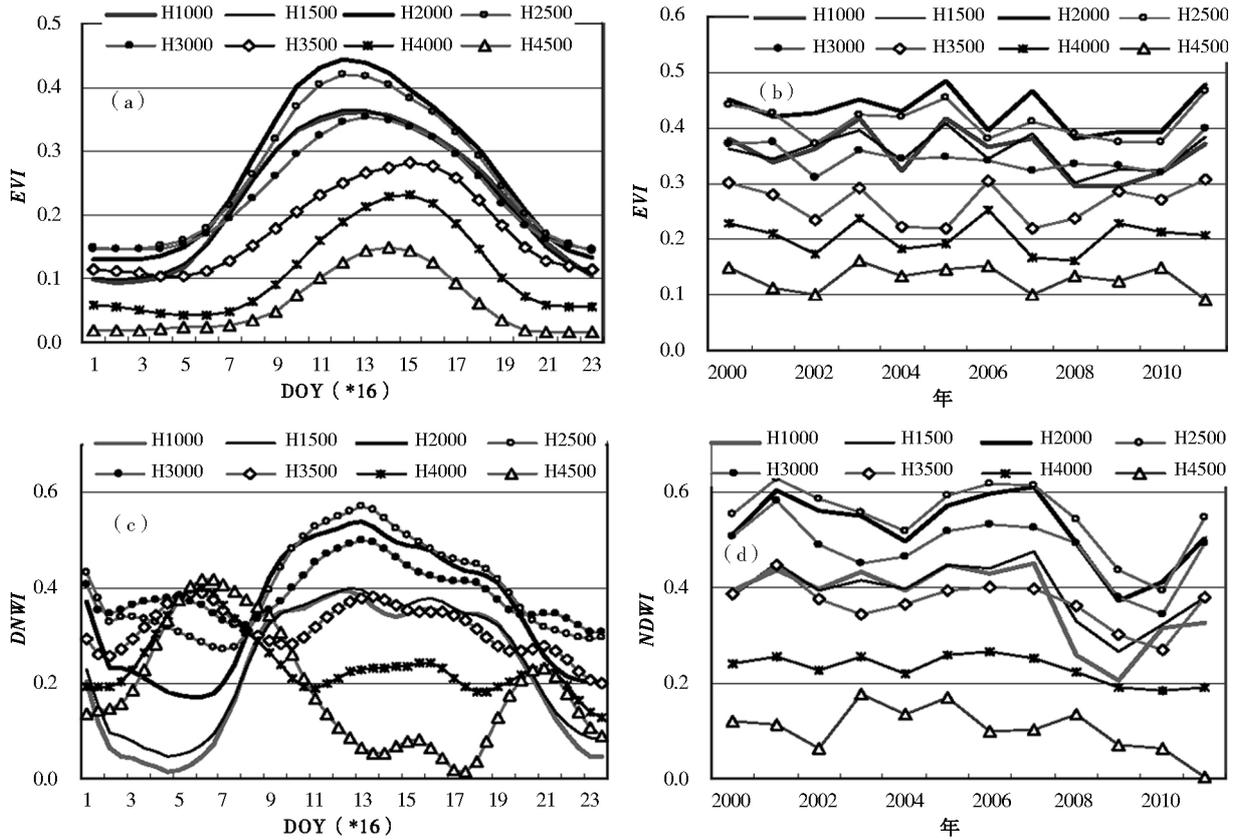


图3 海拔样带 EVI 和 NDWI 的季节变化(a c) 及生长季的年际变化(b d)

Fig.3 The seasonal (a c) and annual (b d) variations of MODIS EVI and NDWI for different altitude zones

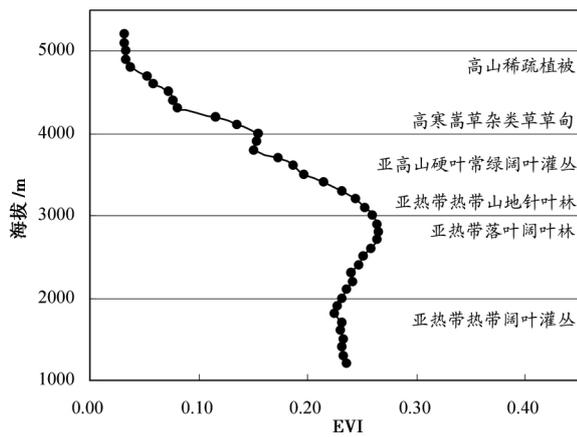


图4 干热河谷效应导致岷江上游植被垂直带谱出现折叠

Fig.4 The “folding” of vertical vegetation spectrum induced by the “arid valley” effect in upper Minjiang

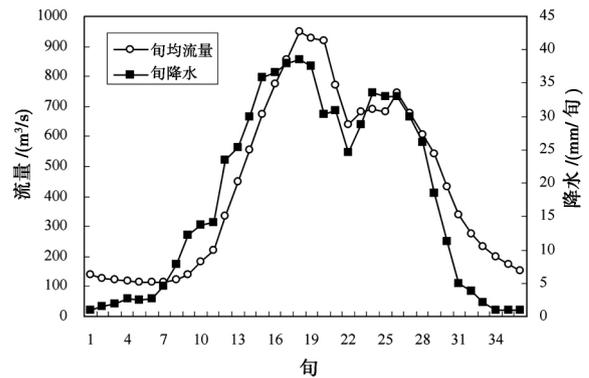


图5 岷江上游径流量对降水的响应

Fig.5 The response of upper Minjiang discharge to precipitation

干化的进一步发展,流域尺度的径流响应可能较为复杂。一方面,暖干化会导致降水减少、蒸发增加,径流会减少;另一方面,暖干化使得森林萎缩,流域整体水源涵养能力下降,径流系数略微增加。因而,岷江上游流域尺度的径流响应变化趋势,取决于降水和径流系数两个变化趋势相反的因素。

### 4 讨论

岷江上游是典型的山区流域,地貌和生态系统多样,具有内部空间分异性<sup>[17]</sup>,其植被的水热条件响应也较为复杂。水分和热量因子,是一般生态系统最为重要的两个环境条件,二者的组合关系通常决定了植被的空间分布和类型特征。由于海拔差异及干热河谷的共同影响,热量和水分条件分别在岷

江流域高海拔和河谷地带成为限制因子,导致由海拔(通过热量)控制的植被垂直带谱在中下部出现折叠现象。这是干热河谷效应的特有现象,在横断山区部分河谷可能更为典型<sup>[2]</sup>。

但是,岷江上游地区未来20 a的植被变化及水文响应形势,可能会比较复杂。区域性的暖干化趋势,会明显影响有效降水和植被类型分布,有效水分供给和径流变化的不确定性较大。而且,岷江在茂县以下河段沿龙门山断裂带南下直至映秀,汶川地震在这一带不仅诱发了大量滑坡和泥石流,而且强大的地壳应力在陡坡坡面上产生了大量的地表碎屑物,震后20 a是滑坡泥石流和水土流失的高发期。这两方面的因素,将导致岷江上游植被及水分响应变得更为复杂。

需指出2008—2010年连续3 a的水分指数偏低,本文的水热资料尚不能予以解释。海拔2 500 m以下植被的生长季水分指数在2008—2010年明显下降,但本研究的资料尚难揭示其原因。2008年初的极端低温对局地植被有所影响,但是这3 a其余时期的水热条件并没有显著异常。汶川地震在岷江上游的1 000~1 600 m海拔范围诱发了近万个滑坡,使得低海拔的植被指数略为偏低。但是,即使植被由于低温或滑坡受到影响,2 500 m以下水热条件并非特别恶劣,灌木特别是草本的迅速恢复,应在季节尺度即可完成。

## 5 结论

本文采用2000—2011年时间序列的卫星遥感和水文气象资料,分析了岷江上游地区植被覆盖对水热条件响应的季相规律及年际变化。研究表明:首先,近40年来该地区暖干化趋势明显,尤其是河谷增温达到全球平均增温幅度的2倍,而同期降水却略有减少,因而导致水热条件形势严峻;其次,植被分布的垂直地带性受干热河谷效应影响,其实际基带(热带/亚热带山地森林)位于河谷灌木带之上,植被垂直带谱出现折叠部分对称;再次,岷江上游水分响应的季相特征同海拔关系密切,大体同降水的季节变化相似:夏高冬低,但是高海拔地区寒旱特征显著,其水分指数季相呈夏低冬高;此外,岷江上游径流系数则呈缓慢减小趋势。因此,水热条件的变化可能会导致现有森林分布范围进一步萎缩,水资源趋紧的形势需引起相应的重视。

## 参考文献(References)

- [1] Yang Dewei, Zhang Yunhong, Wang Daojie, et al. Spatio-temporal Variation of Land Use Changes in the Upper Reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Mountain Science*, 2009, 27(5): 579–584 [杨德伟,张云红,王道杰,等. 岷江上游土地利用的时空分异[J]. *山地学报*, 2009, 27(5): 579–584]
- [2] Zhang Yiping, Duan Zexin, Dou Junxia. Comparison of climate characteristics between a dry-warm valley in upper reaches of Min River and a dry-hot valley of Yuanjiang River [J]. *Researches and Environment in the Yangtze Basin*, 2005, 14(1): 76–82 [张一平,段泽新,窦军霞. 岷江上游干暖河谷与元江干热河谷的气候特征比较研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2005, 14(1): 76–82]
- [3] Li Chongwei, Liu Lijuan, Sun Pengsen et al. A study on the relationship between vegetation pattern and environment in the upstream of Minjiang River [J]. *Journal of Beijing Normal University*, 2005, 41(4): 404–409 [李崇巍,刘丽娟,孙鹏森,等. 岷江上游植被格局与环境关系的研究[J]. *北京师范大学学报:自然科学版*, 2005, 41(4): 404–409]
- [4] Liu Lijuan, Jiu Guosheng, Ge Jianping. Vegetation hydrological effect model of typical watershed in the upstream of Minjiang Valley. *Journal of Beijing Forestry University*, 2004, 26(6): 19–24 [刘丽娟,鲁国盛,葛建平. 岷江上游典型流域植被水文效应模拟[J]. *北京林业大学学报*, 2004, 26(6): 19–24]
- [5] Liu Yanfeng, Chen Xuehua, He Xiubin et al. Studies on the coupling relationship between soil erosion and land use in the upper reaches of Minjiang River [J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2009, 24(5): 161–165 [刘艳锋,陈学华,贺秀斌,等. 岷江上游土壤侵蚀与土地利用的耦合关系研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(5): 161–165]
- [6] Ming Qingzhong, Shi Zhengtao. New discussion on dry valley formation in the Three Parallel Rivers Region [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(1): 99–104 [明庆忠,史正涛. 三江并流区干热河谷成因新探析[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(1): 99–104]
- [7] Lai Yuanchang, Li Xianwei, Feng Shuai et al. Values in the hilly region in Sichuan basin: a case study of Hongya County [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(5): 755–768 [赖元长,李贤伟,冯帅,等. 退耕还林工程对四川盆地低山丘陵区生态系统服务价值的影响[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(5): 755–768]
- [8] Liu Yang, Li Kaiyuan, Li Yong. Analysis of vegetation and landscape variation and driving factors of sources area of the Minjiang river during 1974~2002 [J]. *Yangtze River*, 2005, 38(1): 108–100 [刘洋,李开源,李勇. 岷江源头区植被景观变化及驱动因子分析[J]. *人民长江*, 2005, 38(1): 108–100]
- [9] Zhang Wenjiang, Gao Zhiqiang. Spatial variation of water/thermal elements and NDVI with altitudes in central and eastern Tibetan Plateau [J]. *Geographical Research*, 2006, 25(5): 887–886 [张文江,高志强. 青藏高原中东部水热条件及NDVI在不同海拔的空间分布格局[J]. *地理研究*, 2006, 25(5): 887–886]
- [10] Chen Huailiang, Liu Yujie, Du Zixuan, et al. The change of growing season of the vegetation in Huanghe-Huaihe-Haihe Region and its responses to climate changes [J]. *Journal of Applied Meteorology*

- orological Science, 2011, 22(4): 437-444 [陈怀亮, 刘玉洁, 杜子璇, 等. 黄淮海地区植被生长季变化及其气候变化响应[J]. 应用气象学报, 2011, 22(4): 437-444]
- [11] Zhang Wenjiang, Lu Qifeng, Gao Zhiqiang et al. Response of remotely sensed normalized difference water deviation index to the 2006 drought of eastern Sichuan Basin [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 38(2): 251-260 [张文江, 陆其峰, 高志强, 等. 基于水分距平指数的 2006 年四川盆地东部特大干旱遥感响应分析[J]. 中国科学 D: 地球科学, 2008, 38(2): 251-260]
- [12] Pachauri R K, Reisinger A. Climate change 2007: synthesis report. IPCC [M]. Geneva, Switzerland 2007: 104
- [13] Xu Chong, Dai Fuchu, Xu Xiwei. Wenchuan earthquake-induced landslides: an overview [J]. Geological Review, 2010, 56(6): 860-874 [许冲, 戴福初, 徐锡伟. 汶川地震滑坡灾害研究综述[J]. 地质论评, 2010, 56(6): 860-874]
- [14] Chen Xiaoli, Deng Jianliang, Ran Hongliu. Analysis of landslides triggered by Wenchuan Earthquake [J]. Seismology and Geology, 2011, 33(1): 191-202 [陈晓利, 邓俭良, 冉洪流. 汶川地震滑坡崩塌的空间分布特征[J]. 地震地质, 2011, 33(1): 191-202]
- [15] Zhang W, Lin J, Peng J et al. Estimating Wenchuan Earthquake induced landslides based on remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(13): 3495-3508
- [16] Zhang Wenjiang, Lu Qifeng, Gao Zhiqiang. The spatial heterogeneity of remotely sensing the regional surface water and heat flux [J]. Progress in Nature Science, 2007, 17(10): 1383-1390 [张文江, 陆其峰, 高志强. 区域地表水热通量遥感的空间不均匀性分析[J]. 自然科学进展, 2007, 17(10): 1383-1390]
- [17] Zeng Chao, Zhao Jingfeng, Li Xuejiao. Spatial analysis of hydrological characteristics of the upper reaches of Minjiang River based on GIS technology [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2011, 18(3): 5-9 [曾超, 赵景峰, 李旭娇. GIS 支持下岷江上游水文特征空间分析[J]. 水土保持研究, 2011, 18(3): 5-9]

## The Response of Vegetation Cover to the Variation of Heat and Water Conditions in Upper Minjiang Watershed, China

ZHANG Wenjiang<sup>1</sup>, NING Jicai<sup>2</sup>, SONG Kechao<sup>1</sup>, LI Xiaodong<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>,  
WANG Xin<sup>1</sup>, QIN Guanghua<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China;

2. College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, Sichuan, China)

**Abstract:** The upper Minjiang Watershed of China locates in the transfer zone from Tibetan Plateau to Sichuan Basin, where the local ecosystem is sensitive to the variation of heat and water conditions. Understanding the response mechanism of vegetation to heat and water is beneficial to conserve the water source of upper Yangtze River and to alleviate the soil erosion. The hydrological and meteorological observation and remote images were used to explore the intra- and inter-annual variations in the response of vegetation covers to heat and water conditions in upper Minjiang watershed.

Results of this study suggested the preferable combination of heat and water in upper Minjiang is at the altitude belt between 2 000 ~ 3 000 m, where the dominant tree species is Sichuan-Yunnan *Quercus semecarpifolia* Smith. The region above 3 000 m in altitude is limited by heat condition, and the vegetation types are coniferous forest, shrub, meadow and alpine plant with the increase in altitude. The water plays the limiting factor in the region below 2 000 m because of the arid valley effect, and the dominant vegetation type is shrub. Therefore, the ACTUAL base vegetation spectrum (i. e. coniferous forest) is above the valley shrub belt, which causes the partial folding of the vertical vegetation spectrum in upper Minjiang valley. The climate of this area has been in the trend of warming and drought during past 40 years, which resulted in the gradual decrease in upper Minjiang discharge. The changing conditions of heat and water may shrink the distribution of forest in upper Minjiang watershed, which calls for necessary attentions to the increasing needs in water resources for the urban lower Minjiang watershed.

**Key words:** the upper Minjiang River; vegetation; heat and water; response; water index; valley