

金沙江河谷灌溉需水转折趋势分析

顾世祥^{1,2}, 何大明³, 李远华⁴, 崔远来¹, 李 靖⁵

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 云南省水利水电勘测设计研究院, 云南 昆明 650021;
3. 云南大学亚洲国际河流中心, 云南 昆明 650091; 4. 水利部农村水利司, 北京市 100053;
5. 云南农业大学水利水电与建筑学院, 云南 昆明 650201)

摘要: 基于元谋、宾川、东川、祥云、楚雄及昆明等 6 个站 1960 - 2000 年的逐月气象数据及作物种植、农业耕作等资料, 采用 Mann-Kendall 法和 R/S 分析法研究了金沙江干热河谷近 40 多年来的干湿变化及农业灌溉需水量转折变化趋势。结果表明, 整个河谷内降水量增加、日照时数减少, 气温却出现升高和降低两种趋势, 气温在干热河谷内为下降, 但在龙川江、鱼泡江、普渡河等支流的上游地区呈升高趋势, 但 ET_0 都显著降低, 干湿指数、水稻及农业综合灌溉需水定额也都呈普遍下降的趋势; 金沙江河谷及支流上游的气象因子、 ET_0 、干湿指数、水稻灌溉及农业综合灌溉定额系列的转折变化集中在 20 世纪 70 年代末~80 年代初、80 年代末~90 年代初两个时段, 在降水量最小的宾川站, 对气候变化的响应更为敏感。

关 键 词: 干热河谷; 金沙江; 灌溉需水量; Mann-Kendall 检验; R/S 分析; 纵向岭谷; 趋势分析

中图分类号: P467; S161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)03-0352-09

与以往不同, 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第四次评估报告已直接将全球气候变化与温室气体排放、大气温室气体浓度联系起来, 并向各国政府提出了采取行动的倡议^[1]。根据《气候变化国家评估报告》, 到 2020 年中国平均气温可能升高 1.3~2.1℃, 年均降水量可能增加 2%~3%, 气候变暖将导致作物生长加快, 生长期缩短, 种植制度改变, 带来产量不稳定性加剧, 化肥、农药施用增加等问题^[2,3]。近年来, 在全球气温、干旱变化趋势^[4,5], 中国华北、西北地区的干旱化进程^[6~8], 以及青藏高原、长江流域、西南地区的气温降水径流等的变化规律^[9~12], 都进行了有益的研究探索。此外, 气候变化对北方干旱区水资源特性和作物需水量的影响分析也有报道^[13~15]。研究水文气象要素变化趋势的方法有 Mann-Kendall 检验、奇异谱分析、消除波动趋势法 (DFA) 等^[16~18], 气候转折点变化研究主要采用 R/S 分析法等^[19,20]。

长江干流宜宾以上河段称为金沙江, 是中国干热河谷分布纬度最北端的流域, 主要集中在云南、四川两省交界的华坪 - 永善两个县城之间的金沙江干流, 及川滇两省境内的达旦河、龙川江、小江、牛栏江、雅砻江等支流 800~1200 m 以下的区域^[21,22], 绝大部分还属于纵向岭谷研究的对比区和滇中主要干旱区^[23,24]。研究近半个世纪以来金沙江干热河谷的农业灌溉需水变化趋势及其对全球变化的响应, 对流域实时灌溉预报调度、水资源合理配置等都具有重要意义。

1 资料和方法

1.1 使用的数据

(1) 云南省境内金沙江干热河谷内的元谋、宾川、东川站及支流上游对比的祥云、楚雄、昆明等站点 1960 - 2000 年的逐月最高、最低、平均温度, 相对湿度、日照时数、风速、降水量等资料, 部分资料还向前延

收稿日期: 2007-11-15

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2003CB415105); 云南省水资源综合规划专题研究 (YSZY-2003-01, 07)

作者简介: 顾世祥 (1972 -), 男 (彝族), 云南镇雄人, 高级工程师, 博士, 主要从事农业节水灌溉和水资源开发利用规划研究。E-mail: gushixiang@public.km.yn.cn; gushixiang@qq.com

至建站有记录时起, 各站主要气象要素特征值如表 1。

表 1 金沙江干热河谷典型气象站主要气象因子特征值

Table 1 Main climate factors characteristic values of Jinshajiang dry-arid valley

站点名称	所在河流水系	东经	北纬	海拔 / m	平均温度 /	日照时数 / (h d ⁻¹)	相对湿度 / %	年降水量 / mm	年均 ET_0 / (mm d ⁻¹)	干旱指数 *
宾川	达旦河支流中段	100 34 '	25 50 '	1 438.4	18.0	7.36	63	564.8	3.45	2.78
元谋	龙川江支流下游	101 52 '	25 34 '	1 120.2	21.6	7.18	55	632.8	4.00	3.66
东川	小江支流下游	103 10 '	26 06 '	1 254.1	20.0	6.20	55	725.2	3.89	2.92
昆明	普渡河-滇池流域	102 31 '	25 01 '	1 891.4	14.8	6.36	73	1 003.5	4.23	1.12
祥云	鱼泡江支流上游	100 35 '	25 29 '	2 002.9	14.7	6.88	68	812.9	3.32	1.87
楚雄	龙川江支流上游	101 31 '	25 01 '	1 772.0	15.9	6.22	71	844.6	2.85	1.47

注:干旱指数参考于《云南省水旱灾害》,云南省水利厅,1999 年 10 月。

- (2) 云南省地方标准《用水定额》(DB53/ T168-2006)推荐的县区主要农作物灌溉用水定额。
- (3) 2000 年度各个站点所在灌区的农业经济统计年报。
- (4) 关于基础资料的系列长度, 由于各个站点开始有观测记录的年份均不相同, 故收集建站 - 2000 年的逐月气象资料, 但 ET_0 和干湿指数统一按 1960 - 2000 年系列, 水稻灌溉定额和农业综合灌溉定额按《全国水资源综合规划技术细则》要求, 为 1956 - 2000 年系列, 分别进行插补延长和开展趋势及转折分析。

1.2 灌溉需水量

参考作物腾发量 (ET_0) 的计算方法是 1991 年 FAO 专家咨询会议推荐的 Penman Monteith 方程^[25~27]。根据《灌溉与排水工程设计规范》(GB 50288-99), 作物需水量为 ET_0 与作物系数、土壤水分胁迫系数之连乘积, 灌溉需水量指作物播种前及全生育期单位面积的总灌水量或灌水深度, 可通过田间水层(或土壤水分)动态平衡模拟推求; 农业综合灌溉需水定额是同一区域(或灌区)种植的各种农作物灌溉需水量与其播种面积所占比率的加权平均值^[28,29]。

1.3 Mann-Kendall 趋势检验

Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法(简称 MK 法)主要用于水文气象资料的趋势检验, 如水质、流量、气温和降雨等^[17,18]。给定显著性水平 α , 由正态分布表查临界值 $M_{\alpha/2}$ 。若 $|M| < M_{\alpha/2}$, 则趋势不显著; 若 $|M| > M_{\alpha/2}$, 则趋势显著。且当 M 为正时表示上升或增加的趋势, 反之则为下降或减少趋势。

1.4 R/S 分析法(重新标度极差分析法)

R/S 分析法(Rescaled Range Analysis)主要用于研究流域水文过程的变异点, Hurst 指数 $H > 0.50$, 表示未来的趋势与过去一致, H 越接近 1, 持续性越强; $H < 0.50$, 表明未来的总体趋势与过去相反, 过程具有反持续性, H 越接近 0, 反持续性越强。在变异点处分维数 D_0 和 Hurst 指数 H 都发生较大变化。分别以 $\xi(t)$, $t = 8, 9, \dots, 39$ 为分界点将原序列分为两部分, 分别对其进行 R/S 分析, 得到相应的 Hurst 指数 H_1 和 H_2 之差 ΔH , $\max\{\Delta H\}$ 所对应的点即为变异最大点。Hurst 指数的分析步骤可参见有关文献^[19,20]。

2 变化趋势分析

2.1 干湿状况

利用气象资料计算得到金沙江干热河谷内元谋、宾川、东川站及上游支流对比站祥云、楚雄、昆明站 1960 - 2000 年的逐月 ET_0 系列, 并分析其长期变化趋势, 选择代表年内 ET_0 变化的枯季 (12 月 ~ 次年 4 月, 下同)、雨季 (5 月 ~ 10 月, 下同)、 ET_0 年值等 3 个变量的时间序列过程, 采用 Mann-kendall 法对其长期变化趋势进行检验, 干热河谷内的结果如表 2, 并将上述时段的月平均温度、日照时数、降水量等主要气象因子的趋势检验结果同列于表 2。表中数据为正表示该时段对应的列变量呈增加趋势, 反之则呈降低趋势, 查 t 检验表, $\alpha = 0.05$ 时, $M_{\alpha/2} = 1.96$, 若 $|M| > M_{\alpha/2}$ 则表示其变化达到 $\alpha = 0.05$ 显著性水平。检验结果是 6 个站都是降水量增加、日照时数减少, 但气温却出现升高和降低两种趋势, 即处于干热河谷的东川、元谋为降温, 支流上游

滇中分水岭地带的楚雄、昆明为升温,综合作用下 4 个站的年 ET_0 都是显著下降,通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性检验,年内变化与年值的趋势一致;但在宾川和祥云两个相隔很近的站点则刚好相反,祥云为降温、宾川为升温,且两站的年 ET_0 都是上升趋势,年内变化出现有升有降的复杂情形。金沙江河谷内东川、元谋、宾川三站的 ET_0 年值系列变化如图 1 所示。由于纵向岭谷区降水变化的周期集中在 3.5 年以下高频振荡时域,并具有年代际变化^[30,31]。为消除周期性变化的影响,将 5 年滑动平均值系列也列出对比。

表 2 金沙江干热河谷主要气象因子 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table 2 Main climatic factors Mann-Kendall trend test in Jinshajiang dry-arid valley

站点名称	时段变量	降水量	平均温度	日照时数	ET_0	干湿指数
东川	年值系列	1.827 *	- 3.229 *	- 1.526	- 6.110 *	- 2.718 *
	雨季(5月~10月)	1.581	- 2.282 *	- 1.976 *	- 4.605 *	- 1.550
	枯季(12月~4月)	2.433 *	- 1.695	0.117	- 3.774 *	- 3.459 *
元谋	年值系列	1.683	- 4.343 *	- 2.406 *	- 5.818 *	- 2.606 *
	雨季(5月~10月)	1.233	- 3.111 *	- 2.054 *	- 4.043 *	- 1.730
	枯季(12月~4月)	1.467	- 3.502 *	- 1.213	- 4.178 *	- 4.358 *
宾川	年值系列	0.710	2.244 *	- 1.752	1.325	- 0.022
	雨季(5月~10月)	0.237	0.956	- 1.619	- 0.539	1.483
	枯季(12月~4月)	0.824	2.490 *	- 0.634	3.347 *	- 4.336 *

注: *表示通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平;正表示呈增加趋势,负表示呈降低趋势。

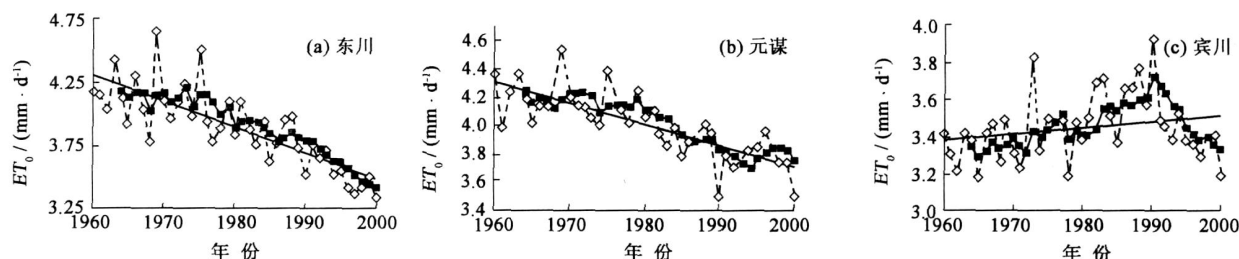


图 1 金沙江河谷典型站 ET_0 系列变化趋势(图中虚曲线为年值,实曲线为 5 年滑动平均,直线为长期变化趋势,下同)

Fig. 1 Yearly ET_0 serial tendency at representative stations in Jinshajiang basin

根据 Vysotskii 模型,干湿指数 I_a 定义为湿润指数的倒数,即为 ET_0 与同期降水量的比值^[32]。对应的干湿状况判别条件为: $I_a \leq 0.99$ 为湿润类型, $1.00 < I_a \leq 1.49$ 为半湿润类型, $1.50 < I_a \leq 3.99$ 为半干旱类型, $I_a \geq 4.00$ 为干旱类型。由于宾川等站点在 12 月~次年 4 月之间的枯水期,经常出现整月降水量为零,即干湿指数趋于无穷大的奇异情形,按月统计干湿指数时可赋予其一个大于 4.00 的常数,以反映出极端干旱状态,但在全年或分季节统计分析时又不能对结果产生过大影响而使结果失真。经综合分析后取上限值 5.00。

通过金沙江河谷内东川、元谋、宾川等站的对比,分析年度的干湿变化趋势,结果如图 2 所示。自 1960 年以来,东川、元谋站的年度和枯季干湿指数都显著降低,朝逐渐湿润的方向演变,宾川亦为降低趋势,但未达到显著性水平;从长期变化趋势看,东川站枯季的干湿指数均大于 4.00,基本属于干旱类型,仅有 3 年接近

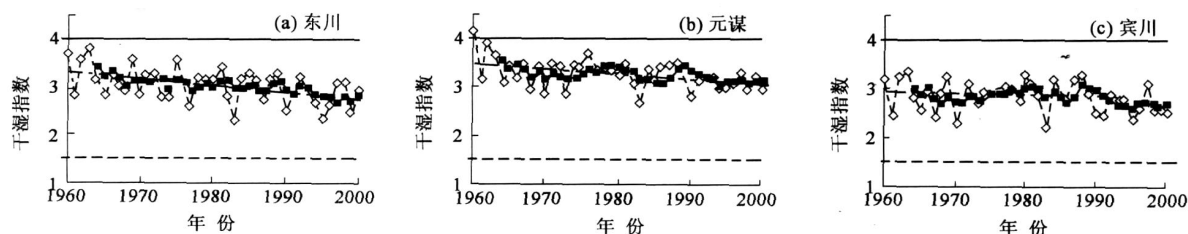


图 2 金沙江河谷典型站的年干湿指数变化(实线、虚线及点划线分别指干湿状况为干旱、半干旱、半湿润类型界限)

Fig. 2 Psychrometer index tendency at representative stations in Jinshajiang basin

或跨过干旱的界限;元谋、宾川两站则完全属于干旱类型。雨季只有宾川的干湿指数增加,其余都是降低,即呈现湿润的趋势。

进一步以宾川站年度和5年滑动平均值分析各个主要气象因子的变化规律,年值曲线掩盖了宾川站的气候变化真实情况。根据各自的5年滑动平均值曲线(图略),宾川站的年降水量在1955-1973年和1981-2000年两个时段为持续增加,但1974-1980年为下降的趋势;对应的年平均温度在1971年以前、1987年以后为两个持续降温期,而1972-1986年则为升温的趋势;日照时数基本上以1990年左右为界,呈先降后升的趋势。综合作用下,在1990年以后的最近十余年来,由于气温下降、降水量增多,尽管日照时数增加, ET_0 仍然呈持续下降的趋势,干湿指数变化规律也没有东川、元谋站显著。

金沙江支流上游的楚雄、祥云、昆明3个站的年度干湿指数为降低趋势,但只有楚雄达到 $\alpha = 0.05$ 显著性水平。3个站的年内枯季和雨季的干湿状况极为分明。在枯季,3站的干湿指数都大于4.00,属于干旱类型;雨季则都处于1.00~2.00之间,属于半湿润类型,长期的干湿变化趋势并不明显。总之,3个站的干湿指数均为下降趋势,与降水量和 ET_0 都是下降的变化趋势相吻合。

2.2 农业灌溉需水定额

根据《全国水资源综合规划技术细则》及有关的技术路线^[29,33],结合金沙江河谷的灌溉用水调查,分析得到1956-2000年各站的水稻灌溉定额(指一季中稻,下同)和农业综合灌溉需水定额系列,这是在现状2000年水平的同一种作物种植结构、土壤及灌溉用水管理模式下,采用历年逐月气象、降水资料进行灌溉制度设计,除气象资料以外的各种边界条件均未发生变化,因此,水稻灌溉需水及农业综合灌溉需水定额系列的年际变化仅反映气候环境改变对作物灌溉需水量的影响。1956-2000年的水稻灌溉及农业综合灌溉需水定额系列变化趋势如表3、图3所示,表中统计量的含义同前。各站的水稻灌溉需水定额和农业综合灌溉需水定额都呈减少趋势,只有宾川的农业综合灌溉定额为增加趋势,元谋的年农业综合灌溉定额和枯季元谋、楚雄、祥云3站的农业综合灌溉需水定额都通过 $\alpha = 0.05$ 水平显著性检验。金沙江干热河谷内主要灌溉期枯季降水增加、干湿指数降低,导致水稻及其它农作物的灌溉需水定额呈下降趋势。但处于达旦河支流的宾川站在各个方面的变化都不同于其它站点,这可能是宾川降水量最小,极度干旱状态下对气候变化的反应更为敏感,出现不同于其它站点的现象。

表3 金沙江流域灌溉需水变量 Mann Kendall 检验结果

Table 3 Irrigation water requirements factors of Mann-Kendall test results in Jinshajiang dry-arid valley

灌溉定额	东川	元谋	宾川	楚雄	祥云	昆明
水稻灌溉定额(全年)	-1.643	-1.330	-0.293	-0.372	-0.137	-0.235
农业综合灌溉定额(全年)	-1.174	-2.074 *	0.528	-1.409	-1.076	-1.017
农业综合灌溉定额(雨季)	-1.291	-1.702	0.528	-0.626	-0.587	-0.372
农业综合灌溉定额(枯季)	-1.506	-2.191 *	0.626	-2.602 *	-1.937 *	-1.037

注: *为表示通过 $\alpha = 0.05$ 显著性水平;正表示呈增加趋势;负表示呈降低趋势。

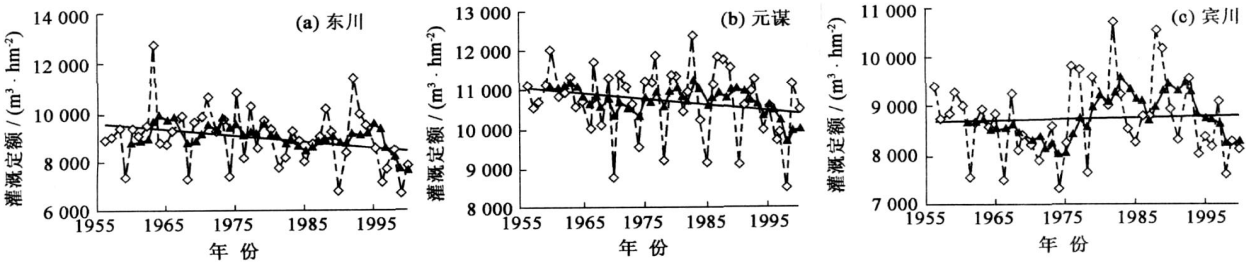


图3 金沙江河谷逐年水稻灌溉定额变化趋势

Fig.3 Paddy irrigation quota serial trend in Jinshajiang basin

3 变异点分析

3.1 干湿状况

金沙江干热河谷内元谋、宾川、东川站及支流对比站祥云、楚雄、昆明的主要气象要素、水稻灌溉需水定额及农业综合灌溉需水定额(年值和枯季)的 Hurst 指数见表 4、表 5。6 个站的 ET_0 年值及枯季、雨季 Hurst 指数均大于 0.50(昆明和楚雄的枯季除外), 呈持续性变化, 过去 40 多年 ET_0 的降低趋势, 在未来一段时期内仍将维持。元谋、宾川、东川站年 ET_0 变量的 R/S 分析结果如图 4 所示。

表 4 金沙江干热河谷各站点气象因子 Hurst 指数

Table 4 The Hurst index of main climatic factors in Jinshajiang dry-arid valley

站名	平均温度			日照时数			降水量			ET_0		
	全年	枯季	雨季	全年	枯季	雨季	全年	枯季	雨季	全年	枯季	雨季
东川	0.701	0.469 *	0.511	0.769	0.687	0.644	0.568	0.530	0.544	0.881	0.721	0.620
元谋	0.777	0.648	0.600	0.638	0.526	0.542	0.532	0.567	0.464 *	0.841	0.786	0.667
宾川	0.871	0.796	0.754	0.751	0.593	0.664	0.719	0.470 *	0.701	0.766	0.754	0.610
楚雄	0.786	0.682	0.770	0.750	0.678	0.765	0.529	0.515	0.512	0.574	0.453 *	0.601
祥云	0.435 *	0.390 *	0.417 *	0.753	0.778	0.715	0.573	0.565	0.668	0.820	0.658	0.678
昆明	0.776	0.710	0.716	0.911	0.721	0.713	0.584	0.584	0.537	0.718	0.475 *	0.629

注: 楚雄、祥云、昆明为对比站点; * 为具有反持续性特征, 存在转折点。

表 5 金沙江干热河谷各站干湿指数及农业需水指标 Hurst 指数

Table 5 Hurst index of irrigation water requirements factors in Jinshajiang dry-arid valley

站名	干湿指数			水稻灌溉 (全年)	农业综合定额		
	全年	枯季	雨季		全年	枯季	雨季
东川	0.535	0.672	0.466 *	0.488 *	0.555	0.650	0.436 *
元谋	0.551	0.570	0.540	0.368 *	0.505	0.585	0.465 *
宾川	0.655	0.345 *	0.734	0.732	0.494 *	0.491 *	0.656
楚雄	0.557	0.579	0.519	0.568	0.468 *	0.496 *	0.553
祥云	0.431 *	0.522	0.600	0.626	0.478 *	0.480 *	0.558
昆明	0.636	0.578	0.501	0.543	0.584	0.616	0.583

注: 楚雄、祥云、昆明为对比站点; * 为具有反持续性特征, 存在转折点。

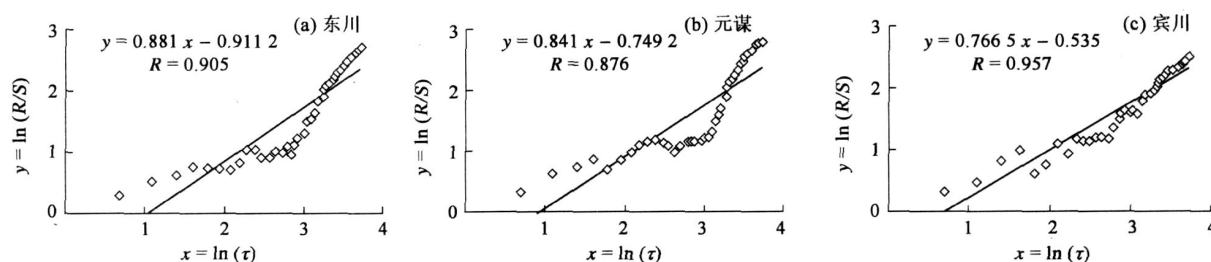


图 4 金沙江河谷典型站逐年 ET_0 系列 R/S 分析

Fig. 4 ET_0 serial R/S analyze of representative stations in Jinshajiang basin

同样地, 对上述 6 个站主要气象因子长期变化的持续性分析结果见表 4, 部分变异点示意如图 5。东川站的枯季平均温度, 元谋站雨季降水量, 宾川站枯季降水量, 楚雄站枯季 ET_0 , 祥云站年度及枯季、雨季平均温度, 昆明站枯季 ET_0 等 8 个变量的 Hurst 指数小于 0.50, 出现反持续性特征, 系列中存在变异点。经诊断分析, 东川站枯季平均温度的变异点为 1979、1994 年, 呈“减-减-骤减”的变化过程, 即 3 个时段的下降幅度各不相同, 且越来越剧烈; 元谋站雨季降水量在 1956 - 1994 年期间的变化趋势不明显, 但 1994 年后为降水量增加; 宾川站枯季降水量在 1955 - 2000 年里呈增加的趋势, 但在 1992 年前后的枯季降水增加幅度越来越大; 楚雄站枯季 ET_0 在 1960 - 1988 年期间是小幅减少, 但 1988 年后却是骤降的趋势; 祥云站年度及枯季、雨季平均温度的转折变异点在 1983

- 1988 年之间, 年平均温度和枯季平均温度的转折变化趋势都是“微增(减) - 剧增”, 雨季平均温度的转折趋势为“增 - 减”变化; 昆明站枯季 ET_0 在 1953 - 1990 年期间为下降趋势, 但 1990 - 2000 年却为剧烈增加的转折变化。

如表 5 所示, 只有东川雨季、宾川枯季、祥云年度干湿指数的 Hurst 指数小于 0.50, 出现转折变化趋势, 东川站雨季干湿指数呈“减 - 增”的变化趋势, 转折点为 1993 年; 祥云站年干湿指数是“微减 - 骤减”的转折变化, 变异点为 1992 年。宾川站出现异常情况, 原因是在 1960 - 2000 年逐月干湿指数中, 每年 12 月至次年 4 月基本是由于降水很小甚至为零, 导致干湿指数过高, 在取上限值后又趋于相同, 故难以进一步做转折分析。

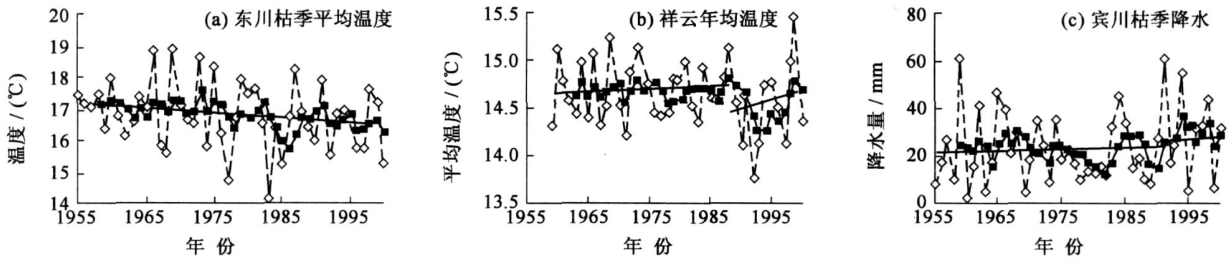


图 5 金沙江河谷气象因子年代际趋势转折检验结果

Fig. 5 Turn point analyze results of main climate factors in Jinshajiang basin

3.2 农业灌溉需水定额

选择水稻灌溉需水定额和农业综合灌溉需水定额(分年值和枯季两个统计时段)作为代表性农业需水变量, 分析系列变化的持续性, 如表 5 所示。东川、元谋两个站水稻灌溉需水定额和除昆明外 5 个站点不同时段农业综合灌溉定额的 Hurst 指数均小于 0.50, 表明整个金沙江干热河谷的农业灌溉需水定额在最近 45 年里的变化趋势是十分复杂的。

东川和元谋两站水稻灌溉定额系列的转折点分别为 1978、1995 年, 转折变化却为“增 - 减”、“减 - 增”的相反趋势。农业综合灌溉定额系列的转折变化除宾川站为“增 - 减”趋势外, 其余 4 个站年度和枯季农业综合灌溉定额转折变化都是“减 - 骤减”或“减 - 增”的趋势, 变异点集中在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初、80 年代末至 90 年代初两个时期。研究表明^[7,34,35], 云南境内 90 年代以来气候带变化最为显著, 加上“蒸发悖论”现象的存在是上述变异点集中在两个时期的气候环境变化原因。金沙江流域内部分典型站点水稻灌溉及农业综合灌溉需水定额系列的转折点分析结果如图 6 所示。

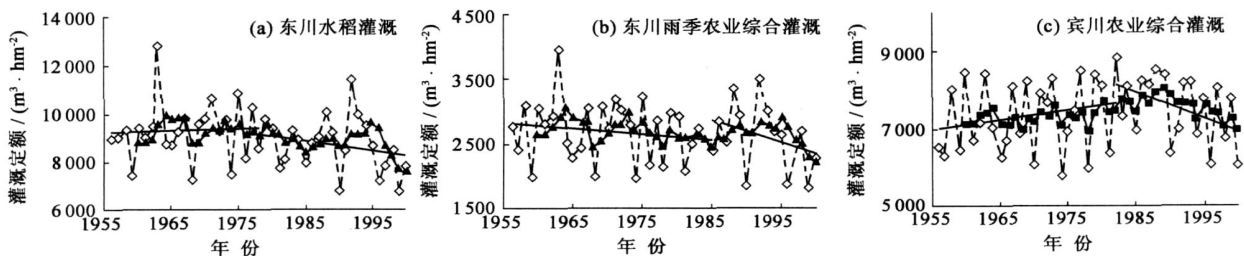


图 6 金沙江河谷农业综合灌溉定额年代际趋势转折检验

Fig. 6 Turn point analyze of total agricultural irrigation quota in Jinshajiang basin

4 结 论

(1) 采用 Mann-Kendall 法进行 1960 - 2000 年金沙江干热河谷内元谋、宾川、东川站及支流上游对比站祥云、楚雄、昆明的 ET_0 、干湿指数及农业灌溉需水量的变化趋势检验, 结果是降水量增加、日照时数减少, 但气温却出现升高和降低两种趋势, 即处于干热河谷的东川、元谋为降温, 而龙川江、鱼泡江、普渡河等支流上游滇中分

水岭地带的楚雄、昆明为升温, 年 ET_0 都是显著下降; 宾川和祥云两个相隔很近的站点则相反, 祥云为降温、宾川为升温, 且两站的年 ET_0 均是上升趋势。各站点的干湿指数普遍为下降趋势, 即向湿润的方向变化。水稻灌溉需水定额和农业综合灌溉需水定额各站都呈减少趋势, 只有宾川的农业综合灌溉定额为增加。

(2) 通过 R/S 分析, 金沙江干热河谷内日照时数和绝大部分站点的平均温度、降水量及 ET_0 (年值、枯季、雨季) 的 Hurst 指数大于 0.50, 未来一段时期仍将维持与过去相同的变化趋势。东川站的枯季平均温度、元谋站雨季降水量、宾川站枯季降水量、楚雄站枯季 ET_0 、祥云站各个时段的平均温度、昆明站枯季 ET_0 等变量出现反持续性特征, 东川雨季、宾川枯季、祥云年度干湿指数出现反持续性特征, 水稻灌溉和农业综合灌溉定额也都普遍出现转折变化趋势, 主要是“增-减”、“减-骤减”两种类型, 变异点集中在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初、80 年代末至 90 年代初两个时期。在降水量最小的宾川站, 反映出对气候变化的响应更为敏感。

致谢: 高磊、苏建广、程刚、蔡昕等同志参与了基础资料的输入及分析计算工作。

参考文献:

- [1] 秦大河, 罗 勇, 陈振林, 等. 气候变化科学的最新进展: IPCC 第四次评估综合报告解析[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(6): 311 - 314. (QIN Da-he, LUO Yong, CHEN Zhen-lin, *et al.* Latest advances in climate change sciences: Interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report[J]. Adv Clim Change Res, 2007, 3(6): 311 - 314. (in Chinese))
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3 - 8. (DING Yi-hui, REN Guo-yu, SHI Guang-yu, *et al.* National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend[J]. Adv Clim Change Res, 2006, 2(1): 3 - 8. (in Chinese))
- [3] 林而达, 许吟隆, 蒋金荷, 等. 气候变化国家评估报告(): 气候变化的影响与适应[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(2): 51 - 56. (LIN Er-da, XU Ying-long, JIANG Jin-he, *et al.* National assessment report of climate change (): Climate change impacts and adaptation[J]. Adv Clim Change Res, 2006, 2(2): 51 - 56. (in Chinese))
- [4] 王绍武, 罗 勇, 闻新宇, 等. 近千年全球温度变化研究的新进展[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(1): 14 - 19. (WANG Shao-wu, LUO Yong, WEN Xin-yu, *et al.* Latest advances in studies of the global temperature variations for the last millennium[J]. Adv Clim Change Res, 2007, 3(1): 14 - 19. (in Chinese))
- [5] 马柱国, 符凉斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其大尺度背景的联系[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(2): 222 - 214. (MA Zhu-guo, FU Zong-bin. Evidences of drying trend in the global during the later half of 20th Century and their relationship with large-scale climate background[J]. Science in China Series D, 2007, 50(5): 776 - 788. (in Chinese))
- [6] 马柱国, 符宗斌. 1951 - 2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. 科学通报, 2006, 51(20): 2429 - 2439. (MA Zhu-guo, FU Cong-bin. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(23): 2913 - 2925. (in Chinese))
- [7] 马柱国, 任小波. 1951 - 2006 年中国区域干旱化特征[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(4): 195 - 201. (MA Zhu-guo, REN Xiao-bo. Drying trend over China from 1951 to 2006[J]. Adv Clim Change Res, 2007, 3(4): 195 - 201. (in Chinese))
- [8] 施晓辉, 徐祥德. 中国大陆冬夏气候型年代际转折的区域结构特征[J]. 科学通报, 2006, 51(17): 2075 - 2084. (SHI Xiao-hui, XU Xiang-de. Regional characteristics of the interdecadal turning of winter/ summer climate modes in Chinese mainland[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(1): 101 - 112. (in Chinese))
- [9] 张 磊, 廖启龙. 青藏高原近 40 年来的降水变化特征[J]. 干旱区地理, 2007, 30(2): 240 - 246. (ZHANG Lei, LIAO Qi-long. Precipitation changes in the Tibetan plateau during the last four decades[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(2): 240 - 246. (in Chinese))
- [10] 张建云, 章四龙, 王金星, 等. 近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 230 - 234. (ZHANG Jian-yun, ZHANG Si-long, WANG Jin-xing, *et al.* Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230 - 234. (in Chinese))
- [11] 姜 彤, 苏布达, 王艳君, 等. 四十年来长江流域气温降水及径流变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 65 - 68. (JIANG Tong, SU Bu-da, WANG Yan-jun, *et al.* Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River basin from 1961 to 2000[J]. Adv Clim Change Res, 2005, 1(2): 65 - 68. (in Chinese))

- [12] 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 我国西南地区 1960 - 2000 年降水资源变化的时空特征[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 76 - 87. (LIU Xiao-ran, LI Guo-ping, FAN Guang-zhou, *et al.* Spatial and temporal characteristics of precipitation resources in southwest China during 1961 - 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(5): 76 - 87. (in Chinese))
- [13] 刘晓英, 林而达. 气候变化对华北地区主要作物需水量的影响[J]. 水利学报, 2004, 35(2): 77 - 83. (LIU Xiao-ying, LIN Er-da. Impact of climate change on water requirement of main crops in North China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 77 - 83. (in Chinese))
- [14] 徐长春, 陈亚宁, 李卫红, 等. 塔里木河流域近 50 年气候变化及其水文过程响应[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊 1): 21 - 30. (XU Chang-chun, CHEN Ya-ning, LI Wei-hong, *et al.* Climate change and hydrologic process response in the Tarim river basin over the past 50 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Supplement): 25 - 36. (in Chinese))
- [15] 丁永建, 叶柏生, 韩添丁, 等. 过去 50 年中国西部气候和径流变化的区域差异[J]. 中国科学 D 辑, 2007, 37(2): 206 - 233. (DING Yong-jian, YE Bo-sheng, HAN Tian-ding, *et al.* Regional difference of annual precipitation and discharge variation over west China during the last 50 years[J]. Science in China Ser, D Earth Sciences, 2007, 50(6): 936 - 945. (in Chinese))
- [16] 王国杰, 姜 彤, 陈桂亚. 长江干流径流的时序结构与长期记忆[J]. 地理学报, 2006, 61(1): 47 - 56. (WANG Guo-jie, JIANG Tong, CHEN Gui-ya. Structure and long-term memory of discharge series in Yangtze River[J]. Acta Geographica Sinica, 2006, 61(1): 47 - 56. (in Chinese))
- [17] 吴 益, 程维明, 任立良, 等. 新疆和田河流域河川径流的时序特征分析[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 375 - 381. (WU Yi, CHENG Wei-ming, REN Li-liang, *et al.* Analysis on the characteristics of annual runoff in Hotan catchment[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 375 - 381. (in Chinese))
- [18] YUE S, PILON P, PHINNEY B, *et al.* Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259: 254 - 271.
- [19] 赵 晶, 王乃昂. 近 50 年来兰州城市气候变化的 R/S 分析[J]. 干旱区地理, 2002, 25(1): 90 - 94. (ZHAO Jin, WANG Nai-ang. R/S analysis of urbanization effect on climate in Lanzhou[J]. Arid Land Geography, 2002, 25(1): 90 - 94. (in Chinese))
- [20] 王孝礼, 胡宝清, 夏 军. 水文时序趋势与变异点的 R/S 分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2): 10 - 12. (WANG Xiao-Li, HU Bao-qing, XIA Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series[J]. Journal of Wuhan University (Engineering Science Edition), 2002, 35(2): 10 - 12. (in Chinese))
- [21] 张荣祖. 横断山区干旱河谷[M]. 北京: 科学出版社, 1996. 145 - 157. (ZHANG Rong-gzu. Arid valley in Hengduan Mountainous plateau[M]. Beijing: Science Press, 1996. 145 - 157. (in Chinese))
- [22] 何永彬, 卢培泽, 朱 彤. 横断山-云南高原干热河谷形成原因研究[J]. 资源科学, 2000, 22(5): 69 - 72. (HE Yong-bin, LU Pei-ze, ZHU Tong. Causes for the formation of dry-hot valleys in Hengduan Mountain-Yunnan plateau[J]. Journal of Resources Science, 2000, 22(5): 69 - 72. (in Chinese))
- [23] FENG Y, HE D M. Research progress on international rivers in Asia[J]. Journal of Geographical Sciences, 2006, 16(3): 271 - 276.
- [24] 何大明, 吴绍洪, 欧晓昆, 等. 纵向岭谷区生态系统变化及西南跨境生态安全研究进展[J]. 地理学报, 2007, 62(1): 93 - 100. (HE Da-ming, WU Shao-hong, OU Xiao-kun, *et al.* Acta Geographica Sinica. Research progress in the Longitudinal Range-Gorge Region (LRGR) ecosystem changes and trans-boundary ecological safety in southwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(1): 93 - 100. (in Chinese))
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, *et al.* Crop evapotranspiration: guideline for computing crop requirement[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No 56, Rome, Italy, 1998. 51 - 202.
- [26] CLARKE D. Crop wat for Windows: User Guide[M]. England: University of Southampton, 1998. 1 - 40.
- [27] 刘 钰, PEREIRA L S, TEIXEIRA J L, 等. 参照腾发量的新定义及计算方法对比[J]. 水利学报, 1997, 28(6): 27 - 33. (LIU Yu, Pereira L S, TEIXEIRA J L, *et al.* Update definition and computation of reference evapotranspiration comparison with former method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(6): 27 - 33. (in Chinese))
- [28] 郭元裕主编. 农田水利学(第三版)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. 18 - 74. (GU Yuan-yu. Irrigation and Drainage Engineering[M]. Beijing: China WaterPower Press, 1998. 18 - 74. (in Chinese))
- [29] 顾世祥, 傅 骅, 高 嵩, 等. 低纬度高原区农业灌溉需水规律研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 71 - 74. (GU Shi-xiang, FU Hua, GAO Song, *et al.* Research on low latitude plateau irrigation district agriculture irrigation water rule[J]. Journal of Irrigation and

- Drainage. 2004, 23(4) :71 - 74. (in Chinese))
- [30] 张万诚, 万云霞, 肖子牛. 中国西南纵向岭谷区近百年来降水的时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2006, 21(5) :802 - 809. (ZHANG Wan-cheng, WAN Yun-xia, XIAO Zi-niu. The spatio-temporal variations of the longitudinal range-gorge region (LRGR) precipitation in recent 100 years in southwest China[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(5) : 802 - 809. (in Chinese))
- [31] 尤卫红, 段长春, 何大明, 等. 纵向岭谷作用下的干湿气候差异及其对跨境河川径流量的影响[J]. 科学通报, 2006, 51(增刊 2) :56 - 65. (YOU Wei-hong, DUAN Chang-chun, HE Da-ming, *et al.* Climatic difference in dry and wet season under effect of the longitudinal range-gorge and its influence on transboundary river runoff[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(Supplement) : 69 - 79. (in Chinese))
- [32] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑 度, 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究[J]. 中国科学 D 辑, 2005, 35(3) :276 - 283. (WU Shao-hong, YIN Yun-he, ZHENG Du, *et al.* Aridity/ humidity status of land surface in China during the last three decades[J]. Science in China Ser. D Earth Sciences, 2005, 48(9) : 1510 - 1518. (in Chinese))
- [33] 顾世祥, 何大明, 崔远来, 等. 纵向岭谷区灌溉需水空间变异性及其与“通道-阻隔”作用的关系[J]. 科学通报, 2007, 52(增刊) :29 - 36. (GU Shi-xiang, HE Da-ming, CUI Yuan-lai, *et al.* Spatial variability of irrigation factors and their relationships with “corridor-barrier” functions in the longitudinal range-gorge region[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(Supplement) : 33 - 41. (in Chinese))
- [34] 王顺久. 全球气候变化对水文水资源的影响[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(5) :223 - 227. (WANG Shun-jiu. Impacts of global climate change on hydrology and water Resources[J]. Adv Clim Change Res, 2006, 2(5) :223 - 227. (in Chinese))
- [35] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2) :147 - 152. (CONG Zhen-tao, NI Guang-heng, YANG Da-wen, *et al.* Evaporation paradox in China[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(2) : 147 - 152. (in Chinese))

Agriculture irrigation water requirements change and R/ S analysis of Jinshajiang dry-arid valley in recent 40 years^{*}

GU Shi-xiang^{1,2}, HE Da-ming³, LI Yuan-hua⁴, CUI Yuan-lai¹, LI Jing⁵

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

2. YunNan Institute of Water Resources and Hydropower Engineering Investigation, Design and Research, Kunming 650021, China;

3. YunNan University, Kunming 650091, China; 4. Department of Irrigation, Drainage and Rural Water Supply, MWR, Beijing 100053, China; 5. YunNan Agriculture University, Kunming 650201, China)

Abstract : Based on the monthly climate records of Yuanmou, Binchan, Dongchuan, Xiangyun, Chuxiong, and Kunming stations in the period 1960 - 2000, as well as crop pattern and cultivate data in 2000, the Mann-Kendall trend and the Rescaled Range Analysis (abbr. R/ S) method are adopted to research the tendency in aridity-humidity and irrigation water requirements in Jinshajiang dry-arid valley in the last 40 years. The results show that the precipitation and the temperature decrease, and sunshine hours increase in the valley. But the temperature increases in the branch upstream of Longchuanjiang, Yupaojiang, Puduhe, etc, thus, results in ET_0 decreases remarkable in Jinshajiang basin. Furthermore, the aridity-humidity index, paddy irrigation quota and total agriculture irrigation quota also decreases. The turn point of climate factors, ET_0 , aridity-humidity index, paddy irrigation quota and total agriculture irrigation quota in Jinshajiang valley are focused the late 1970s - 1980s and the late 1980s - the early 1990s, and Binchuan station which occurs minimum precipitation is most sensitivity to climates change.

Key words : dry-arid valley; Jinshajiang; agriculture irrigation water requirements; Mann-Kendall test; R/ S analysis; longitudinal range gorge region; trend analysis

^{*} The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (No. 2003CB415105).