

塔克拉玛干沙漠腹地降雨特征分析

钟昕洁¹, 高宇星², 马凯¹, 张爱强³, 周成龙^{1,4}

(1. 巴州气象局, 新疆 库尔勒 841000; 2. 西安市气象局, 陕西 西安 710000;

3. 塔中气象站, 新疆 塔中 841000; 4. 中国气象局 乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: [目的] 探究塔克拉玛干沙漠腹地降雨特征, 为该区生态环境建设提供支持。[方法] 利用塔中气象站 2005—2014 年 4—10 月的逐小时降水量资料, 通过对雨强、降水量、雨日等综合分析塔中地区近 10 a 降雨特征。[结果] 研究区逐小时降水量和降水频次在时次分布上具有较好的一致性, 23:00 至翌日 8:00 时为高值区, 17:00 到 22:00 为低值区; 1 h 雨强(用 R_1 表示), 降水频次最多是 $R_1 \leq 0.5$ mm 的降水, 占总频次的 64.5%, 其次是 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm, 但从对降水的贡献率来看 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm 的贡献率最高, 占总降水量的 26.4%, 其次是 $R_1 \geq 4.6$ mm; 不同量级降水过程(用 R 表示), $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2$ mm 的降水过程发生频次最多, $R \geq 6.1$ mm 降水过程对降水量贡献率最大, 占总降水量的 52.6%; 夜间为降水的易发时段; $R \geq 6.1$ mm 的降水过程主要集中在 5—7 月, 尤其多发生在 6 月, 且有 1/2 发生在前半夜; 5 h 以下的降水占了降水总数的 85.5%。[结论] 研究区的降水主要以短时夜雨为主, 近年来 ≥ 6.1 mm 雨日呈增加且稳定趋势, 因此沙漠地区有出现大降水的可能性。

关键词: 降水; 雨强; 持续时间; 塔克拉玛干沙漠腹地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0303-05

中图分类号: P458.1, S157.1

文献参数: 钟昕洁, 高宇星, 马凯等. 塔克拉玛干沙漠腹地降雨特征分析[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 303-307. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.051

Analysis of Rainfall Variation In Hinterland of Taklamakan Desert

ZHONG Xinjie¹, GAO Yuxing², MA Kai¹, ZHANG Aiqiang³, ZHOU Chenglong^{1,4}

(1. Bazhou Meteorological Bureau, Kuerle, Xinjiang 841000, China; 2. Xi'an Meteorological

Bureau, Xi'an, Shaanxi 710000, China; 3. Tazhong Meteorological Station, Tazhong, Xinjiang 841000,

China; 4. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, Xinjiang 830002, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of precipitation in the hinterland of Taklimakan Desert were explored to provide support for the construction of ecological environment. [Methods] Based on the hourly precipitation data from April to October during 2005—2014 from Tazhong meteorological station, the rainfall intensity, precipitation and the days of precipitation, etc. were analyzed to describe the rainfall characteristics of Tazhong area. [Results] The diurnal variations of hourly precipitation and rainfall frequency were consistent in the study area. The peaks of hourly rainfall and rainfall frequency both occurred from 23:00 to 08:00, and the minimum value occurred from 17:00 to 22:00. The frequency of rainfall (represented by R_1) ≤ 0.5 mm were the most and accounted for 64.5% of all rainfall events, the following intensities were $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm and $R_1 \geq 4.6$ mm. The contribution of $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm was the highest and accounted for 26.4% of the total precipitation amount. In terms of the magnitude of precipitation (R), light rain or less of $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2$ mm occurred the most, but $R \geq 6.1$ mm precipitation events had the highest contribution to the total precipitation, the value was 52.6%. The rain was more frequently occurred in night time. Moderate rain focused from May to July, especially in June, half of that occurred in the first half of night. The precipitation duration of less than or equal to 5 h accounted for 85.5%. [Conclusion] The precipitation in the study

收稿日期: 2015-11-20

修回日期: 2016-02-29

资助项目: 公益性行业(气象)科研专项“干旱气象科学研究—我国北方干旱致灾过程及机理”(GYHY201506001)

第一作者: 钟昕洁(1989—), 女(汉族), 新疆维吾尔自治区库尔勒市人, 助理工程师, 主要从事公共气象服务。E-mail: baohululdacheng@163.com。

通讯作者: 周成龙(1986—), 男(汉族), 江苏省邳州市人, 硕士, 工程师, 主要从事沙漠气象研究。E-mail: 592432611@qq.com。

area were mainly composed of short-time night-rain. In recent years, the precipitation of ≥ 6.1 mm showed a trend of stable increase, so the large precipitation in desert area may be possible.

Keywords: rainfall; rainfall intensity; duration; the hinterland of Taklimakan Desert

降水作为沙漠地区的重要水分来源,对沙丘移动和植被分布皆有影响^[1],同时对全球气候变化响应也十分敏感^[2]。而对于降水的研究,也由过去单一地对降水量研究转向对降水量、雨日、雨强的综合研究。近年来众多学者以逐日、逐小时资料为基础对有关降水事件进行分析,并获取一定认知^[3-6]。对于塔克拉玛干沙漠,众多学者大都关注在水汽含量方面,崔丽娜等^[7]利用 2009 年 7 月和 9 月塔中站的地基 GPS 观测数据,给出了塔中及周边地区可降水量的日、月分布特征;俞亚勋^[8]、王宝鉴等^[9]分别利用 NCEP/NCAR1958—2000 年和 1961—2003 年 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 格点再分析资料分析西北地区水汽时空分布特征后,前者认为塔克拉玛干沙漠的水汽含量达到 40 mm 以上,后者表明塔克拉玛干沙漠地区中心年平均值超过 150 mm;赵芬等^[10]也认为塔克拉玛干沙漠中心是水汽含量高值区;杨青等^[11]利用 1976—2009 年塔里木盆地 5 个探空站的实测资料,给出塔克拉玛干沙漠腹地是水汽的低值区中心,水汽含量仅为 7~8 mm。可以看出,有关塔克拉玛干沙漠腹地水汽含量的研究目前尚存在不同的看法,而关于该地区降水的研究更鲜有报道,基于此,本研究拟利用塔中气象站 2005—2014 年 4—10 月的塔中气象站的逐小时长期连续降水资料对沙漠地区的降水做精细化特征分析,进而与不同下垫面的降水以及沙漠腹地可降水量进行对比分析,从而更直观地体现沙漠腹地的降水特征。

1 资料与方法

选用塔中气象站 2005—2014 年 4—10 月的逐小时降水量资料,通过筛选去除缺测的降水记录,对逐小时降雨高发时段、降水频次和不同量级逐小时雨强发生频次、雨日等进行统计分析。对逐小时降水频次的统计,只要该时刻内降水大于等于 0.1 mm,就认为该小时内有一次降水发生,然后统计各时次降水频次的总和。雨强,又称降雨强度,指单位时间的降雨量,文中雨强均指 1 h 雨强,现将 1 h 雨强(用 R_1 表示)分为 6 个量级,即 $R_1 \leq 0.5$ mm, 0.6 mm $\leq R_1 \leq 1.5$ mm, 1.6 mm $\leq R_1 \leq 2.5$ mm, 2.6 mm $\leq R_1 \leq 3.5$ mm, 3.6 mm $\leq R_1 \leq 4.5$ mm, $R_1 \geq 4.6$ mm, 分别统计各量级发生的频次。将 1 h 雨强不同量级降水量之和占各量级降水量总和的百分比称为各量级降水对总量级的贡献率。分析不同量级降水变化特征时,按降水过程来统计降水量,过程降水量用 R 表示,现将

该地区过程降水量分为: 0.1 mm $\leq R \leq 2$ mm, 2.1 mm $\leq R \leq 4$ mm, 4.1 mm $\leq R \leq 6$ mm 以及 $R \geq 6.1$ mm 共 4 个量级。当一次降水结束后 6 h 没有降水发生,就认定为该次降水结束。对不同量级降水的日变化特征分析,考虑塔中所处时区,将每日分为 4 个时段:上午(08:00—13:00)、下午(14:00—19:00)、前半夜(20:00—01:00)、后半夜(02:00—07:00)。雨日定义为日降水量大于等于 0.1 mm 的日数,如果前一日 20:00(北京时,后同)到当日 20:00 之间的降水量大于等于 0.1 mm,就记为一个雨日,这 24 h 内的降水量叫作日雨量。现将该地区雨日分为: 0.6 mm \leq 雨量 ≤ 2 mm, 大于等于 2.1 mm \leq 雨量 ≤ 4 mm, 4.1 mm \leq 雨量 ≤ 6 mm 和 ≥ 6.1 mm 共 4 个等级。

2 结果与分析

2.1 逐小时降水日变化

通过逐小时累积降水量日变化(图 1)可以看出,累积降水量最多的时次是 23:00, 占总降水量的 12.2%, 最少的时次是 19:00, 仅占总降水量的 1.2%。夜间 23:00 至早上 08:00 为降水的高值时段, 占总降水量的 52.5%, 17:00 至 22:00 为降水的低值时段, 仅为总降水量的 14.6%。近 10 a 不同年份之间相同时次降水量有很大差异, 各时次的降水量有显著的年际变化, 一年之内不同时刻的降水量差异也非常大。崔丽娜^[7]利用 GPS 观测数据给出了塔克拉玛干沙漠腹地日大气可降水量的两个极大值出现在 08:00 和 23:00, 2 个极小值出现在 01:00 和 14:00, 且最大值与最小值仅差 1 mm。以上可以看出, 沙漠腹地的降水量和可降水量在时次分布上具有较好的一致性, 但是在降水转化率上差异较为明显。

由图 1 可知, 夜间 23:00 至 16:00 为降水易发时段, 该时段累计降水频次达到了总降水频次的 83.5%, 且这一时段内各时次降水频次均超过了 10 次, 其中早上 06:00 降水次数最多, 达到了 20 次。17:00 至 22:00 为降水频次的低值区, 最小值出现在 20:00, 仅有 6 次降水。塔克拉玛干沙漠腹地近 10 a 降水频次与降水量通过线性拟合, 二者相关性不明显 ($R^2 = 0.34$), 但是二者的日分布却表现较为一致, 因此沙漠腹地各时次降水量除和降水频次有关外, 其他因素也起到重要作用。对比唐治^[12-13]和王世杰等^[14]对伊宁市和乌鲁木齐市所得逐小时降水量和降水频次日分布特征, 3 种不同下垫面所得结论大致相同。

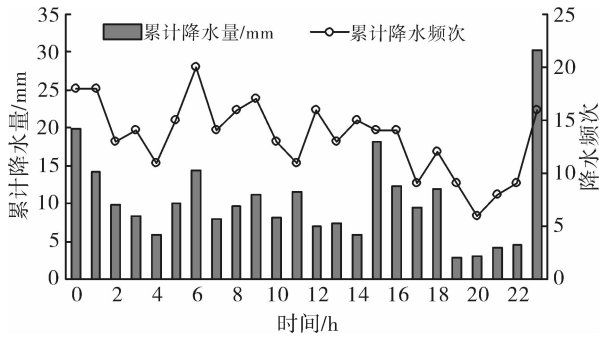


图 1 研究区 2005—2014 年逐小时累积降水量与小时累积降水频次日变化

2.2 雨强和不同量级的降水变化特征

通过对 1 h 雨强的降水量和降水频次统计得到塔克拉玛干沙漠腹地近 10 a 中逐小时降水共 321 次,降水量总和为 248.1 mm。如图 2 所示,1 h 雨强, $R_1 \leq 0.5$ mm 的累积频次最多,共 207 次,占降水频次总和的 64.5%,累积降水量为 45.1 mm,对降水总量的贡献率为 18.2%。 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm 累积降水 71 次,占降水频次总和的 22.1%,累积降水量为 65.6 mm,对降水总量的贡献率为 26.4%。 $1.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 2.5$ mm 累积降水共 19 次,占降水频次总和的 5.9%,累积降水量为 38.1 mm,对降水总量的贡献率为 15.4%。 $2.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 3.5$ mm 的降水频次共 11 次,占降水频次总和的 3.4%,共产生降水量为 31.7 mm,对降水总量的贡献率为 12.8%。 $3.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 4.5$ mm 和 $R_1 \geq 4.6$ mm 的累积降水频次分别为 4 次和 9 次,分别占降水频次总和的 1.2% 和 2.8%,各产生降水量 16.4 和 51.2 mm,对降水总量的贡献率分别为 6.6% 和 20.6%。综上,沙漠腹地 1 h 雨强从降水频次来看以 $R_1 \leq 0.5$ mm 为主,但 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5$ mm 对降水总量的贡献最大。塔克拉玛干沙漠腹地 1 h 最大雨强出现在 2005 年 5 月 15 日 23 时,降水量达到 8.5 mm,这在下垫面为沙漠的塔中地区是极其罕见的。

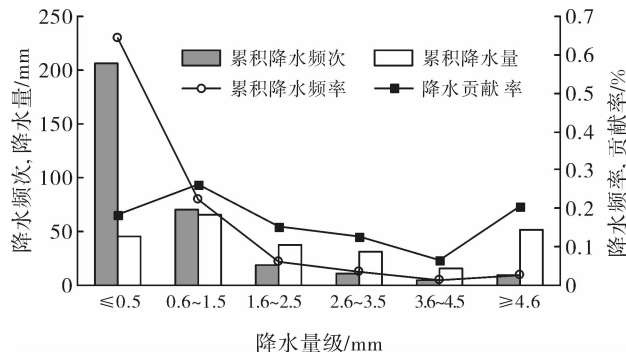


图 2 研究区不同量级雨强降水量及频次变化特征

图 3 和表 1 给出了塔克拉玛干沙漠腹地近 10 a 不同量级降水频次的逐年变化以及各自总持续时间、总降水量的对比分布。塔中地区降水频次以 $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2 \text{ mm}$ 过程为主,此量级的降水过程变化最为明显,呈波浪式前进,整体有下降趋势,其中 2006 年出现 13 次,为近 10 a 最多,最少出现在 2008 年,仅 6 次,10 a 共发生此过程 93 次,共产生降水量 54.9 mm,平均每年 9.3 次,每次 0.6 mm,总持续时间为 191 h,平均每次持续时间为 2 h。 $2.1 \text{ mm} \leq R \leq 4 \text{ mm}$ 和 $4.1 \text{ mm} \leq R \leq 6 \text{ mm}$ 这 2 个降水过程不同年份间存在一定的差异,其中前者共发生 14 次,总持续时间 87 h,共产生降水 39.1 mm,后者 10 a 间仅发生 5 次,总持续时间 15 h,产生降水总量为 23.7 mm。近 10 a 内 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 降水过程,在 2008—2010 年没有出现,但 2005 年和 2011—2013 年各发生了 2 次此类降水过程,可见近年来有增加且稳定的趋势。10 a 共发生这样的过程 12 次,总持续时间为 92 h,共产生降水 130.4 mm,平均每年都发生 1.2 次,每次持续时间为 7.6 h,每次产生降水 11 mm。由此可见 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 的降水过程对整个沙漠降水量贡献最大。

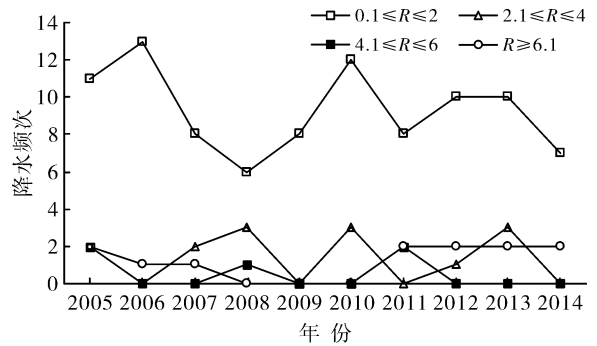


图 3 不同量级降水频次 (R, mm) 的 annual 变化

表 1 不同量级降水频次,持续时间和降水量对比

降水量级/mm	总频次	总持续时间/h	总降水量/mm
$0.1 \leq R \leq 2$	93	191	54.9
$2.1 \leq R \leq 4$	14	87	39.1
$4.1 \leq R \leq 6$	5	15	23.7
$R \geq 6.1$	12	92	130.4

由表 2 统计可以得到,上午,下午,前半夜和后半夜分别共出现降水过程 30,29,33 和 32 次,即各时间段出现降水过程的概率差别不大。 $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2 \text{ mm}$ 的降水过程最易发生在上午和后半夜,各出现 25 次,分别占各自时段降水频次的 83% 和 78%,各占此量级降水频次的 27%; $2.1 \text{ mm} \leq R \leq 4 \text{ mm}$ 的降水过程最容易发生在前半夜,占此量级降水频次的 36%; $4.1 \text{ mm} \leq R \leq 6 \text{ mm}$ 的降水过程在下午没出现

过,而夜间出现的概率达到该量级的 80%; $R \geq 6.1$ mm 的降水过程最易发生在前半夜,几乎占到了该量级降水频次的 50%。沙漠腹地降水易发生在夜间,主要以夜雨为主,唐冶等^[13]给出伊宁市小雨降水过程易发生在后半夜,中雨、大雨和暴雨易发生在前半夜;王世杰等^[14]经过统计得到乌鲁木齐市前半夜为小雨、中雨和大雨易发时段,下午为暴雨过程易发

时段。通过对比,沙漠腹地虽降水量明显少于它们,但降水易发时段大都发生在夜间,这可能与新疆所处地形有关,张家宝等^[15]指出,夜间降水次数出现多的原因主要是局地地形和冷空气活动的综合影响。上午,下午,前半夜和后半夜各自共产生降水量分别为 47.8,54.6,90.1 和 55.6 mm。夜间降水的贡献率最大,占总降水量的 59%。

表 2 研究区不同量级降水过程发生时段统计

降水量级	上午			下午			前半夜			后半夜		
	总频次	总持续时间	总降水量	总频次	总持续时间	总降水量	总频次	总持续时间	总降水量	总频次	总持续时间	总降水量
$0.1 \leq R \leq 2$	25	50	12.8	22	39	10.9	21	48	14.8	25	54	16.4
$2.1 \leq R \leq 4$	2	15	6.1	4	20	10.6	5	32	14.1	3	20	8.3
$4.1 \leq R \leq 6$	1	5	5.6	0	0	0	2	8	8.5	2	2	9.6
$R \geq 6.1$	2	16	23.3	3	16	33.1	5	42	52.7	2	18	21.3
总和	30	86	47.8	29	75	54.6	33	130	90.1	32	94	55.6

注:量级、降水量、持续时间单位分别为 mm,mm,h。

塔克拉玛干沙漠腹地的降雨 10 a 间在 4 和 10 月仅发生 6 次降水过程,因此本研究主要分析 5—9 月各月的降水过程。从各月降水过程来看,6 月为降水过程发生最多月份,9 月为最少月份。通过图 4 可以看出,5—9 月的降水过程主要以 $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2 \text{ mm}$ 为主,分别占各月降水过程总数的 82.6%,73.8%,71.0%,66.7% 和 77.8%。 $2.1 \text{ mm} \leq R \leq 4 \text{ mm}$ 的降水过程主要发生在 7 月,占此量级发生频次的 50%; $4.1 \text{ mm} \leq R \leq 6 \text{ mm}$ 的降水过程在各月中发生的次数最少,7 和 9 月没有发生过此类降水。 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 的降水主要发生在 6 月,占此量级降水频次的 66.7%,8 和 9 月没有发生这类降水过程,因此 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 的降水过程主要集中在 5—7 月,尤其多发生在 6 月。

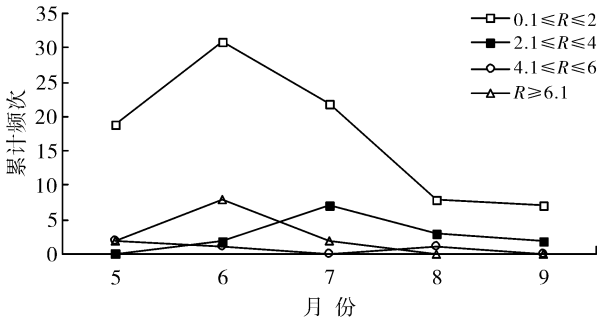


图 4 不同量级降水频次的月变化 (R 单位:mm)

2.3 不同持续时间降水变化特征

图 5 给出了不同持续时间降水的日变化特征,可以看出不同持续时间的降水在一日之内表现出了不同的变化特征。各时刻主要还是以持续 1~3 h 的降

水为主,其中 06:00 出现 9 次,为最多,23:00 次多,为 7 次,02:00,10:00,11:00 和 20:00 出现次数最少,各仅 1 次。随着持续时间的增加,各时刻降水频次明显减少,10 a 中持续时间在 7 h 以上的共出现了 17 次,持续 10~12 h 的降水共发生了 6 次,分别出现在 11:00,18:00 以及夜间 22:00 到翌日 02:00,持续 13~15 和 16 h 以上的降水仅各出现了 1 次,分别发生在 07:00 和 22:00。塔克拉玛干沙漠腹地近 10 a 共 124 次降水过程(表 3),持续 1 h 的降水共 54 次,占降水总频次的 43.5%,持续 2~5 h 的降水分别占降水总频次的 19.4%,8.9%,6.5% 和 7.3%,5 h 以下的降水占降水总数的 85.5%。因此塔克拉玛干沙漠腹地主要还是以短时降水为主。

表 3 研究区不同持续时间的频次对比

持续时间/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	≥ 12
总频次	54	24	11	8	9	1	4	2	3	4	2	2

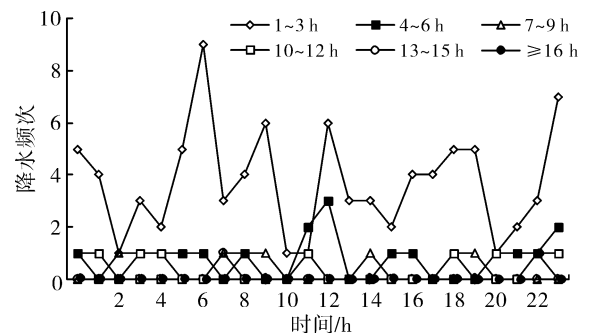


图 5 研究区不同持续时间的日变化

2.4 雨日的变化特征

表4给出了塔克拉玛干沙漠腹地不同等级雨日的逐年变化状况。

由表4可以看出,塔克拉玛干沙漠腹地近10 a共有降雨日数125 d,平均每年12.5 d,年降雨日数超过15 d的分别出现在2005和2010年,2009年降雨日数仅7 d。大于等于0.1 mm小于等于2 mm的雨日总数为95 d,平均每年9.5 d,其中2006年和2010年有13 d,为10 a中最大,2008,2009和2014年有

7 d,为10 a中最小,整体降水日数还是以此等级为主,它占到总雨日的76%。大于等于6.1 mm的雨日10 a共12 d,其中2008—2010年没有发生这样等级的雨日,但2011—2014年都有2 d这类较大的降水,大于等于6.1 mm的雨日有增加且稳定的趋势。塔克拉玛干沙漠腹地各等级的雨日年际变化显著,如大于等于2.1 mm小于等于4 mm和大于等于4.1 mm小于等于6 mm的降水日数,有的年份一年可以出现几天,而有的年份一年之内也没有出现过。

表4 雨日的年变化统计

年份	不同雨量雨日/d				总雨日/d
	0.1~2 mm	2.1~4 mm	4.1~6 mm	≥6.1 mm	
2005	11	2	2	2	17
2006	13	0	0	1	14
2007	9	2	0	1	12
2008	7	2	1	0	10
2009	7	0	0	0	7
2010	13	3	0	0	16
2011	8	0	2	2	12
2012	10	1	0	2	13
2013	10	3	0	2	15
2014	7	0	0	2	9
合计	95	13	5	12	125

3 讨论与结论

(1) 塔克拉玛干沙漠腹地近10 a逐小时累积降水量和累积频次在时次分布上具有较好的一致性,23:00至翌日08:00为高值区,17:00到22:00为低值区,但二者相关性不明显,相关系数 R^2 为0.34,且各时次降水转化率差异较为明显。

(2) 1 h雨强,降水频次最多量级是 $R_1 \leq 0.5$ mm的降水,占总频次的64.5%,其次是 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5 \text{ mm}$,但从对降水的贡献率来看 $0.6 \text{ mm} \leq R_1 \leq 1.5 \text{ mm}$ 的贡献率最高,占总降水量的26.4%,其次是 $R_1 \geq 4.6 \text{ mm}$ 的降水;不同量级降水过程均有较明显的年际差异, $0.1 \text{ mm} \leq R \leq 2 \text{ mm}$ 的降水过程发生频次最多,但从对降水量贡献来看, $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 降水过程的贡献率最大,占总降水量的52.6%。

(3) 夜间为沙漠腹地降水的易发时段,与不同下垫面对比,所得结论较为一致,这与局地地形和冷空气活动的综合影响有关^[15]。 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 降水过程主要集中在5—7月,尤其多发生在6月,且有1/2发

生在前半夜。

(4) 塔克拉玛干沙漠腹地主要还是以短时降水为主,06:00出现频次最多,23:00次之,其中5 h以下降水占降水总数的85.5%。

(5) 从近10 a沙漠腹地 $\geq 6.1 \text{ mm}$ 的雨日来看,有增加且稳定的趋势,各等级雨日年际变化显著,有的年份一年可以出现几天,而有的年份一年之内也没有出现过。

新疆地区降雨过程具有地域特色,其形成机制与季风区有很大差异。塔克拉玛干沙漠腹地近年来 $R \geq 6.1 \text{ mm}$ 的降水过程呈现增加趋势。何清等^[16]结合1988年塔克拉玛干沙漠的实测资料证实沙漠腹地大暴雨存在的可能性,王敏仲等^[17]总结4大云系只要进入塔里木盆地活动,都会影响沙漠降水。而我们对于沙漠腹地较大降雨的关注和研究都较少,防灾减灾和利用气象资源能力与社会经济发展的需要还有很大差距。因此对该地区降水的环流形势、动力机制和水汽来源等问题都有待进一步的研究,以提高该地区降雨的预报准确率。

(下转第314页)

半湿润半干旱过渡区洮河流域植被盖度变化特征

许幼霞, 周旭, 赵娟, 周秋文, 韦小茶

(贵州师范大学 地理与环境科学学院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 通过对半湿润半干旱过渡区洮河流域较高空间分辨率植被盖度变化分析, 为新一轮退耕还林还草政策落实, 流域生态文明建设和可持续发展决策等提供参考。[方法] 以 1993 年 Landsat 5 TM, 2001 年 Landsat 7 ETM⁺, 2015 年 Landsat 8 OLI 和 ASTER GDEM 为数据源, 先用像元二分模型反演植被盖度, 再用流域分区、高程、坡度及坡向分级所得基础单元, 统计分析各单元内的植被盖度均值和植被盖度变化面积比例。[结果] 1993—2015 年洮河流域植被盖度均值增加了 17.52%, 正向变化面积比占 62.24%, 负向变化面积仍占有 6.41%; 3 期数据均表明, 高程 2 500 m 以下植被盖度最低, 高程 4 000 m 以上无明显变化与负向变化面积比例之和最大; 坡度 0°~5°, 10°~15° 之间植被盖度均值最低但增幅最大, 无明显变化和负向变化面积比例之和随坡度增加而增加, 并在 60° 以上达到最大; 坡向对植被盖度分布的限制作用逐渐减弱。[结论] 洮河流域植被地形分异特征明显, 植被盖度总体呈现增加趋势, 但还存在一定的负向变化; 未来应重视高程 2 500 m 以下, 坡度 20° 以下, 坡向为平地、西坡、南坡的植被恢复; 加强 4 000 m 以上, 坡度 45° 以上和东坡、东北坡现有植被生态保护。

关键词: 植被盖度变化; 高程; 坡度; 坡向; 半干旱半湿润过渡区; 洮河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0308-07

中图分类号: S717, S157.1

文献参数: 许幼霞, 周旭, 赵娟, 等. 半湿润半干旱过渡区洮河流域植被盖度变化特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 308-314. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.052

Vegetation Coverage Variation Features River in Semi-humid and Semi-dry Transitional Region of Taohe River Basin

XU Youxia, ZHOU Xu, ZHAO Juan, ZHOU Qiuwen, WEI Xiaocha

(School of Geographic and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The objective of this paper was to analyze the variation of vegetation coverage in semi-humid and semi-dry transitional region of Taohe River basin through high resolution RS image in order to provide a reference for the implementation of new way of returning farmland to forest and grassland, and for decision making of the basin's ecological civilization construction and sustainable development. [Methods] Landsat 5TM in 1993, Landsat 7ETM⁺ in 2000, Landsat 8 OLI in 2015 and ASTER GDEM data sets were used in this paper. Firstly, Dimidiate Pixel Model was used to invert vegetation coverage. Then base units extracted from the basin partition, elevation, slope and aspect were used to count and analyze the mean and variation area ratio of vegetation coverage. [Results] On a whole level, vegetation coverage mean increased by 17.52% in Taohe River basin from 1993 to 2015. Increased area covered 62.24% and the decreased covered 6.41%. The date sets showed that the lowest vegetation coverage was below the altitude of 2 000 m. The sum area ratio of decrease and no significant change run up to the maximum as the altitude is above 4 000 m. Vegetation coverage reached the lowest but increased fast in the slopes between 0°~5° and 10°~15°. The sum area ratio of decrease and no significant change grew with the increase of slope, and reached its highest as it was above 60° (covered 67.48%). Effect of slope exposure to the the distribution of

收稿日期: 2016-01-14

修回日期: 2016-03-17

资助项目: 国家“十二五”科技支撑计划项目“黄河中游河川径流锐减驱动力及人为调控效应研究”(2012BAB02B00); 黄河水利委员会科技项目; 贵州省教育厅教改项目

第一作者: 许幼霞(1991—), 女(汉族), 安徽省合肥市人, 硕士研究生, 研究方向为土地规划与 GIS 应用。E-mail: 394159469@qq.com。

通讯作者: 周旭(1981—), 男(汉族), 四川省古蔺县人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事遥感水文与 GIS 应用研究。E-mail: zxy8178@163.com。

the vegetation coverage was weaken. [Conclusion] The results showed that the basin's general trend of vegetation coverage was increasing, but there were still decrease in some areas and had significant variation features. In the future we should pay great attention to vegetation restoration in the areas as the elevation is below 2 500 m, slope grade is below 20° and the slope aspect is western, southern or at level ground. Existing vegetation should be well protected in the elevation above 4 000 m, and when slope is above 45° and slope aspect is eastern and northeast.

Keywords: vegetation coverage; elevation; slope; aspect; semi-humid and semi-dry transitional region; Taohe basin

陆地表面典型过渡区是地理学、生态学和大气科学等多学科高度重视的热点区域^[1-5]。中国半干旱半湿润过渡区主要分布在东北、华北及青藏高原中东部^[6],面积超过全国土地面积的 1/3,是生态环境十分脆弱且对全球变化高度敏感的区域。植被作为陆地生态系统的重要组分,也是全球及区域尺度生态环境变化的关键指标。中国在东北及青藏高原等典型过渡区的植被变化研究成果丰硕^[7-15]。但这些成果多用 NOAA/AVHRR,GIMMS NDVI,SPOT VEG-ETATION 或 MODIS NDVI 等较低空间分辨率数据,研究大区域植被整体变化特征,及其与气温、降水、干燥度或人类活动等因素的关系。植被变化是多因素、多时空尺度长期相互作用的结果。以水土保持与生态恢复为根本目的的造林、种草、退耕还林还草等植被活动,已大量落实到小流域或坡面等小范围尺度,大空间尺度的宏观趋势研究已不足以支撑后续生态恢复工程布局与效益评价等。高程、坡度和坡向通过影响降雨分配和土壤水分运移等,进而影响小气候变化,同时影响人类活动的可进入性。焦超卫等^[16]研究证实植被分布与高程、坡度和坡向关系密切;周旭等^[17]研究发现不同高程和坡向分区内,植被恢复的空间差异和可持续性差异显著;蔡宏等^[18]研究指出植被变化受坡向和坡度的影响较大。洮河流域是黄河上游一级支流,具有高寒湿润半湿润与温带半干旱气候特征,是青藏高原东缘向陇西黄土高原过渡区,同时是典型的半湿润半干旱过渡区。因此,用 30 m 较高空间分辨率遥感数据,探明洮河流域植被盖度变化特征,能够为多时空尺度植被盖度变化分析,新一轮退耕还林还草政策落实以及流域生态文明建设和可持续发展决策等提供参考。

1 研究区概况

洮河为黄河上游右岸一级支流,位于 101°30′—104°20′ E, 34°05′—35°58′ N,流域面积约 25 527 km²^[19-20]。河流发源于昆仑山余脉西倾山的勒尔当,由西向东经碌曲、临潭、卓尼至岷县北折,经临洮到永

靖矛龙峡汇入黄河,干流全长 673 km。流域内地势自西南向东北逐级降低,最高高程 4 866 m,最低高程 1 002 m。地貌以白石山、太子山为界,分别是甘南高原和陇西黄土高原,属于青藏高原东缘向黄土高原西南缘过渡带。集水单元以岷县断面和海甸峡断面为界,分别为上、中、下游。下游为黄土高原温带半干旱气候区,沟壑纵横,塬梁峁与深切河谷相间分布,年均降水量 400~600 mm,植被以半干旱稀疏林地与稀疏草地为主。中上游为甘南高原高寒湿润半湿润气候区,由地势平缓、河谷开阔的草原区过渡为高山耸立、河流曲折的森林草原区,年均降水量 600~900 mm,植被以高寒草原草甸和山地森林为主。中上游水源涵养能力强,是引洮工程的饮水区;下游地表破碎,水土流失严重。独特的自然要素区域差异是资源利用与生态恢复的基础条件。

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

为了研究相对精细尺度的植被盖度变化特征,本研究分别从中国地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)和美国马里兰大学 GLCF 平台(<http://www.landcover.org/>),下载洮河流域 1993 年 Landsat 5 TM,2001 年 Landsat 7 ETM⁺,2015 年 Landsat 8 OLI 和 ASTER GDEM 数据,空间分辨率均为 30 m。遥感数据行列号分别为 130/35,130/36,131/35,131/36,成像时间集中在植被生长季,图像质量较好。所有数据均用 ENVI 5.0 和 ArcGIS 10.2 进行波段合成、几何校正、快速大气校正、拼接和裁剪等预处理,投影定义为我国常用的 Albers 双标准纬线等面积割圆锥投影。

2.2 研究方法

2.2.1 植被盖度遥感反演 相关研究证实,植被盖度遥感反演用像元二分模型效果较好^[21]。该模型与 TM 数据结合反演精度为 75.4%^[22],与 MODIS 数据结合反演精度达 87.13%^[23]。由于归一化植被指数 NDVI 不仅与植被的生长状态和盖度等有极强的

相关性,而且还能消除部分辐射误差的影响,因此,它常被用来构建像元二分模型(1)反演植被盖度^[24]。模型应用的关键是合理确定 $NDVI_{soil}$ 和 $NDVI_{veg}$ 的值。在此,结合野外调研及 Google Earth 高分辨率、多时相植被变化特征,分别采样足够数量的完全裸露土壤和完全植被覆盖样本数据,辅助确定 3 期植被盖度反演的关键阈值。

$$\begin{cases} NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \\ VC = (NDVI - NDVI_{soil}) / (NDVI_{veg} - NDVI_{soil}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $NDVI$ ——归一化植被指数; NIR ——近红外波; R ——红光波段; VC ——植被盖度; $NDVI_{soil}$ ——完全裸露土壤的 $NDVI$ 值; $NDVI_{veg}$ ——完全植被覆盖的 $NDVI$ 值。

反演结果经流域专家实地调研,目视估测现状植被盖度检验精度达 90% 以上。再参考水利部《土壤侵蚀分级标准》,将植被盖度分为 1 级植被覆盖 (< 30%)、2 级植被覆盖 (30%~45%)、3 级植被覆盖 (45%~60%)、4 级植被覆盖 (60%~75%) 和 5 级植被覆盖 (> 70%)。植被覆盖级别越高,长势和盖度越好,反演得到 3 期植被盖度图为后续分析做准备。

2.2.2 植被盖度变化分析 为分析植被盖度变化特征,参考文献[16-18],用 DEM 提取出高程、坡度和坡向 3 因子数据后,再按表 1 将各因子数据进行分级得到相应的统计分析基础单元。

表 1 地形因子分级标准

序号	高程/m	坡向/(°)	坡度/(°)
1	1 002~1 500	-1(平地)	0~5
2	1 500~2 000	0~22.5, 337.5~360(北坡)	5~10
3	2 000~2500	22.5~67.5(东北坡)	10~15
4	2 500~3 000	67.5~112.5(东坡)	15~20
5	3 000~3 500	112.5~157.5(东南坡)	20~25
6	3 500~4 000	157.5~202.5(南坡)	25~30
7	4 000~4 866	202.5~247.5(西南坡)	30~35
8		247.5~292.5(西坡)	35~40
9		292.5~337.5(西北坡)	40~45
10			45~50
11			50~55
12			55~60
13			>60

为分析植被盖度整体变化特征,将流域内典型地貌分区图、高程、坡度及坡向分级图分别与 3 期植被盖度图空间叠加,运用公式(2)逐像元统计各基础单元内的植被盖度均值,均值越大表明植被覆盖整体质量越高。

$$\overline{VC_{m,n}} = \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N VC_{i,j} \quad (2)$$

式中: $\overline{VC_{m,n}}$ ——第 m 年份第 n 单元的植被盖度均值; $VC_{(i,j)}$ ——第 i 行、第 j 列的植被盖度值; M ——总行数; N ——总列数。

为分析不同单元内、不同年份间植被盖度的正负向变化特征,将 2015 年植被盖度减去 1993 年植被盖度后,用公式(3)逐像元判断出植被盖度变化方向后,再统计各向植被盖度变化的面积比例,比例越大表明该类植被变化主导性越强。

$$DVC_{(i,j)} = \frac{VC'_{(i,j)} - \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N VC'_{(i,j)}}{\sqrt{\frac{1}{M \cdot N} (VC'_{(i,j)} - \frac{1}{M \cdot N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N VC'_{(i,j)})^2}} \quad (3)$$

式中: $DVC_{(i,j)}$ ——植被盖度变化阈值; VC' ——2015 与 1993 年植被盖度之差; i —— VC' 的第 i 行, j —— VC' 的第 j 行; M ——总行数; N ——总列数。若 $DVC_{(i,j)} > 1$ 则表示正向变化,若 $DVC_{(i,j)} < 1$ 则表示负向变化,若 $-1 \leq DVC_{(i,j)} \leq 1$ 则表示无明显变化。

3 结果与分析

3.1 全流域植被盖度变化特征

遥感反演植被盖度空间分布如图 1 所示。由图 1 可见,3 期植被盖度均呈由南向北逐渐降低的趋势。统计全流域及各地貌单元的植被盖度均值如图 2 所示。由图 2 可见,洮河下游黄土区、中上游甘南高原区和全流域的植被盖度均值,1993 年分别为 22.63%, 56.99% 和 48.36%, 2001 年分别为 25%, 63.4% 和 53.75%。2015 年分别为 58.03%, 71.15% 和 65.88%。黄土区和甘南高原植被盖度差距呈减小趋势,植被盖度总体呈增加趋势,全流域平均增加了 17.42%。全流域 1, 2, 3, 4, 5 各级植被覆盖面积比例,1993 年分别为 29%, 10.33%, 21.66%, 28.51% 和 10.49%, 2001 年分别为 30.63%, 8.9%, 13.6%, 18.08% 和 28.79%, 2015 年分别为 8.2%, 8.3%, 17.5%, 29.5% 和 36.6%。全流域植被盖度变化主要表现为较低植被覆盖面积比例减少和较高

植被覆盖面积比例增加。22 a 间洮河流域植被盖度变化空间分布如图 3 所示。

统计发现,全流域植被盖度正向变化面积比例为 66.23%,无明显变化面积比例为 31.35%,负向变化面积比例为 6.41%,植被盖度变化以大面积正向变化为主。正向变化集中分布在下游黄土区和洮河中

游大拐弯处,表明黄土区恶劣自然条件下人为植被恢复效果已较显著。无明显变化出现在下游黄土区北端及黄土区西南缘向甘南高原过渡区内、中游森林区南缘和上游草原区,表明在地形边缘和林地边缘过渡区的植被恢复还有待加强。负向变化零星分布在上游草原区。

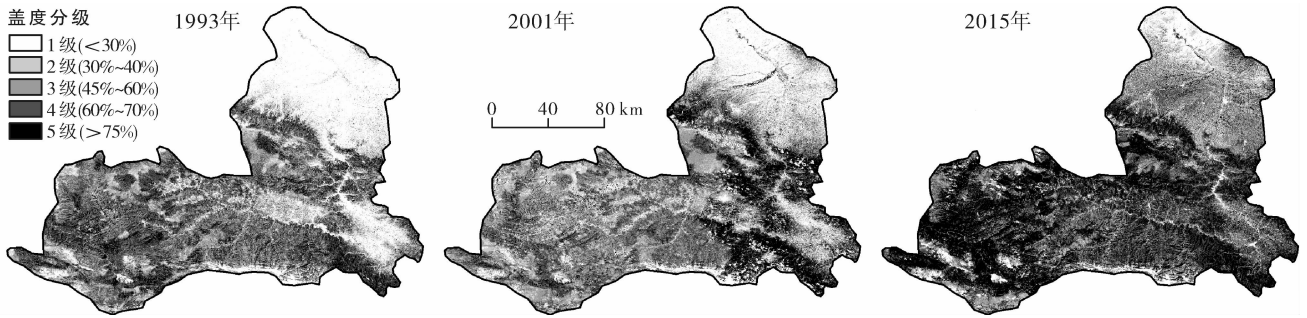


图 1 洮河流域 3 期植被盖度空间分布

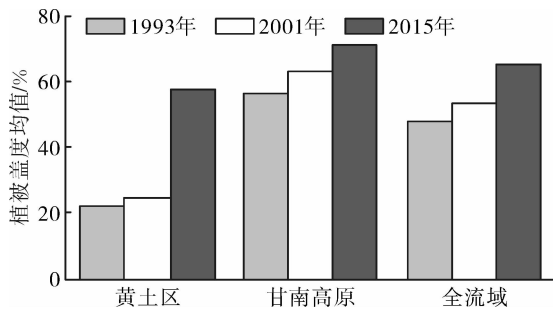


图 2 洮河流域植被盖度均值分区统计

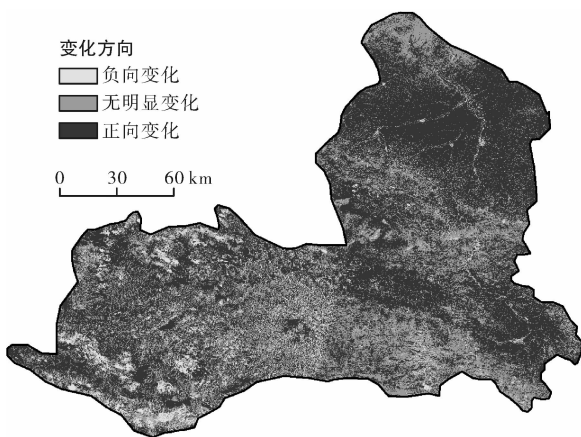


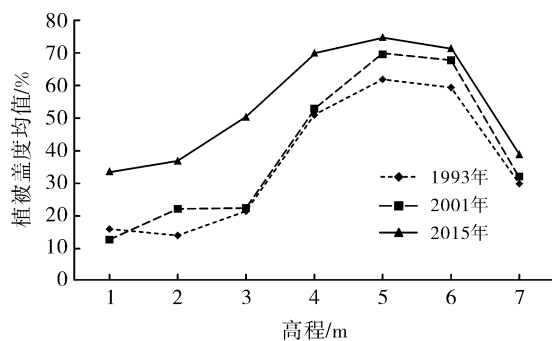
图 3 洮河流域 22 a 间植被盖度变化空间分布

3.2 植被盖度随高程变化特征

洮河植被盖度均值随高程变化的分异特征如图 4 所示。由图 4 可见,3 期植被盖度随高程变化均表现为随高程增加先增加后减少,盖度均值最小值都出

现在 2 000 m 以下,高程上升到 2 000 m 后均迅速增加,3 000~3 500 m 区间出现最大值,4 000 m 后又迅速减小。这与洮河流域高程 2 000 m 后,地貌由陇西黄土高原向甘南高原过渡,半湿润气候条件下降水量增加土壤水分条件变好,4 000 m 以上高寒气候水热条件变差等垂向分异规律是相适应的。同时,各高程带上 2015 年植被盖度均值均明显高于 2000 年的值,这与李常斌等发现近期洮河流域气温持续增加,杨林山等指出气温增加促进上游植被恢复、人工措施促进下游植被活动增强等解释是较符合的。22 a 间植被盖度均值增幅较大出现在 1 500~2 000 m (23.09%)和 2 000~2 500 m (29.11%)区间,增幅较小出现在 3 500~4 000 m (12.19%),4 000 m 以上 (9.09%)区间。总体来看,低海拔植被盖度一直处于较低水平,但增长速度最快,仍是未来植被生态恢复的关键带。海拔 4 000 m 以上,植被盖度较低且恢复速度慢,要特别注意这一地带现有植被保护。

植被盖度变化面积比例随高程变化的分异特征如图 5 所示。由图 5 可见,在各级高程范围植被盖度变化表现为:正向变化面积比例>无明显变化面积比例>负向变化面积比例。同时,随着海拔升高正向变化逐渐变小而负向变化逐渐增加,1 500~2 000 m, 2 500~3 000 m, 3 000~3 500 m, 3 500~4 000 m 及 4 000 m 以上区间负向变化与无明显变化面积比之和较大,分别为 32.81%, 36.57%, 45.62%, 43.55% 和 56.34%,这些地区在生态恢复的同时要特别注意负向变化问题,防止生态退化。



注:1 表示高程范围为 1 002~1 500 m;2 为 1 500~2 000 m;3 为 2 000~2 500 m;4 为 2 500~3 000 m;5 为 3 000~3 500 m;6 为 3 500~4 000 m;7 为 4 000 以下。下同。

图 4 洮河流域植被盖度均值随高程变化统计

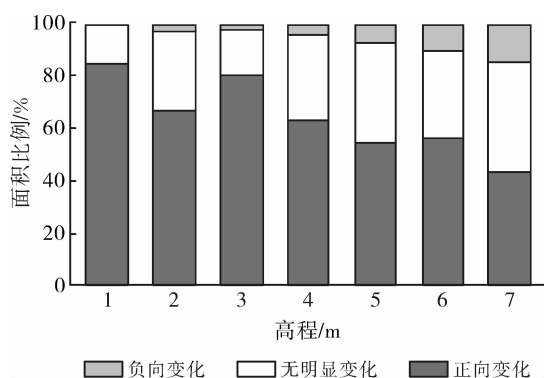


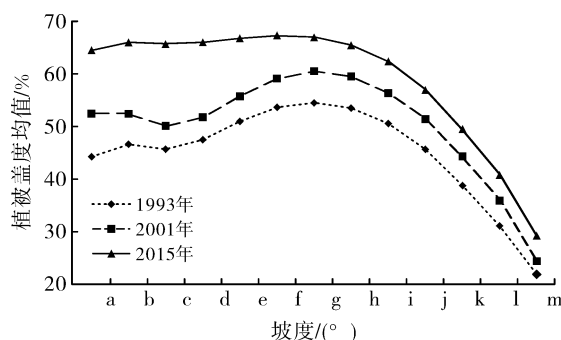
图 5 洮河流域植被盖度变化随高程变化统计

3.3 植被盖度随坡度变化特征

植被盖度均值随坡度变化的分异特征如图 6 所示。由 6 可见,3 期植被盖度均值均随坡度增加而先缓慢增加后迅速减少,植被盖度增幅随坡度增加而迅速减小,说明坡度越高植被恢复越困难。植被盖度最低值出现在 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$, $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间,但增幅最快,22 a 间分别增加 20.26% 和 19.96%。3 期盖度值均在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间出现凹陷,说明这 2 个坡度级植被受人类活动影响大,且对恢复重建措施响应最快。2015 年植被盖度值在各个坡度级上均较 1993 和 2001 年有较明显增加,且最大值所在坡度由 1993 年和 2001 年的 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 之间下移到 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间,这是气候暖干化背景下,持续落实 25° 以上坡耕地退耕还林还草的重要成效。

植被盖度变化面积比例随坡度变化的分异特征如图 7 所示。由图 7 可见,植被盖度正向变化面积比例较大值依次在 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ (占 67.25%), $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ (占 66.22%), $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ (占 66.91%), $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$ (占 64.29%) 之间,且正向变化面积比例随坡度增加呈减少趋势,说明坡度越低,植被恢复越快。无明显变化和负向变化面积比例之和较大的依次在 60° 以上(占

67.48%), $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$ (占 58.82%), $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$ (占 53.92%), $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$ (占 51.12%) 之间,整体呈随坡度增加而增加的趋势,这些坡度级仍然是未来植被生态恢复的关键区域。



注:a 为 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$; b 为 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$; c 为 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$; d 为 $15^{\circ}\sim 20^{\circ}$; e 为 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}$; f 为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$; g 为 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$; h 为 $35^{\circ}\sim 40^{\circ}$; i 为 $40^{\circ}\sim 45^{\circ}$; j 为 $45^{\circ}\sim 50^{\circ}$; k 为 $50^{\circ}\sim 55^{\circ}$; l 为 $55^{\circ}\sim 60^{\circ}$; m 为 60° 以上。

图 6 洮河流域植被盖度随坡度变化统计

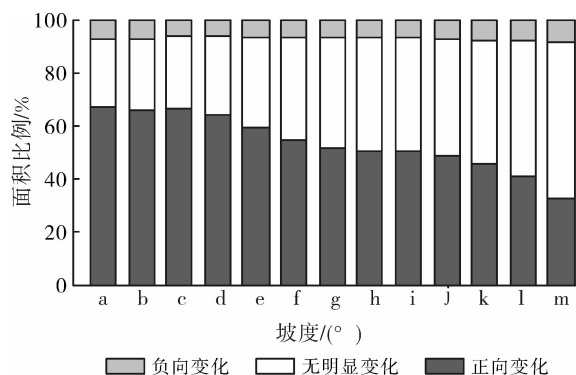


图 7 洮河流域植被盖度变化随坡度变化统计

3.4 植被盖度随坡向变化特征

植被盖度均值随坡向变化的分异特征如图 8 所示,3 期植被盖度均值都在平地达到最小值。1993 和 2001 年都在东北坡达到最高值分别为 51.11% 和 57.29%,东北坡、东坡植被明显高于南坡及其他坡向;较好的体现了干旱条件下阳坡光照较强、水分较差、植被较差,而阴坡光照较弱、水分较好、植被较好的自然状态。2015 年,植被盖度最大值变为东坡为 67.46%,在各个坡向上平均增加了 18.29%,在平地、西坡、南坡增幅较大,分别为 23.66%, 18.64%, 18.25%。同时,植被盖度值在个坡向的差距变小,在造林、种草和退耕还林还草等积极人类活动与当地水热条件耦合作用下,坡向对植被盖度分布的限制作用在逐渐减弱。

植被盖度变化面积比例随高程变化的分异特征如图 9 所示。可见,植被盖度正向变化面积比例较大

的依次为平地(68.65%)、南坡(65.40%)、西坡(64.63%)和西南坡(64.5%);无明显变化面积比例较大的依次为东北坡(34.33%)、北坡(34.25%)、西北坡(32.56%);负向变化面积比例较大的依次为东坡(8.16%)、东北坡(7.73%)、东南坡(6.99%)。北坡、东北坡和东坡的负向变化与无明显变化面积比例之和均在40%左右,植被恢复过程中可能存在顾此失彼的问题,未来在原本植被长势较好的阴坡上仍有较强的植被恢复潜力。

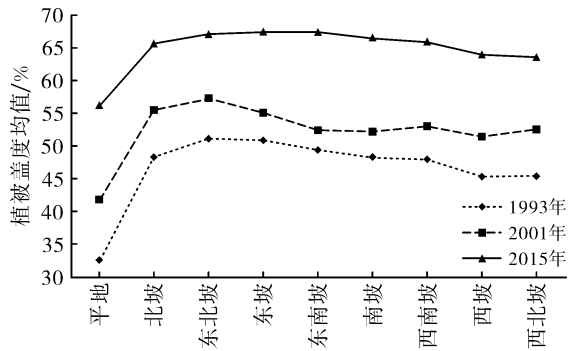


图8 洮河流域植被盖度随坡向变化统计

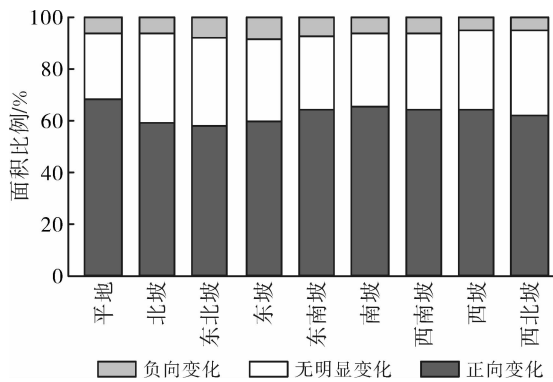


图9 洮河流域植被盖度变化随坡向变化统计

4 结论

(1) 全流域植被盖度变化主要表现为流域北部植被盖度值增加迅速而南部增加缓慢,较低植被覆盖面积减少而较高植被覆盖面积增加。1993—2015年,洮河流域植被盖度总体平均增加了17.52%,黄土区植被盖度增加35.4%,甘南高原增加14.16%,北部增加较快而南部增加缓慢。22 a间1,2,3,4,5级植被盖度变化值分别为-20.8%, -2.07%, -4.16%, 0.95%, 26.09%,低级植被盖度减小而高级植被盖度增加。

(2) 植被盖度在高程上的分异特征表现为盖度均值随高程增加而先增加后减少,海拔越低植被恢复

速度越快,海拔越高负向变化越大。3期植被盖度峰值均出现在3000~3500 m范围内,最低值出现在2500 m以下;低海拔植被盖度较低,但增长速度较快,海拔4000 m以上,植被盖度较低且恢复速度慢。同时,随着海拔升高正向变化逐渐变小而负向变化逐渐增加,要特别注意高海拔区域现有植被的保护。

(3) 植被盖度在坡度上的分异特征表现为植被盖度均值随坡度增加而先缓慢增加后迅速减少,无明显变化与负向变化之和随坡度增加而增加。坡度越低植被恢复越快,坡度越高植被恢复越困难。3期数据均在 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 之间出现凹陷且增幅较大,说明洮河流域 $10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ 坡度级受人类活动影响最大,坡度 45° 以上无明显变化与正向变化之和的平均值为56.13%,未来植被生态恢复与保护应十分重视这些区域。

(4) 植被盖度在坡向上的分异特征表现为植被盖度均值在平地达到最小值,在东北坡和东坡达到最高值,北坡、东北坡、东坡无明显变化和负向变化之和较大,均在40%左右,要注意生态恢复过程中顾此失彼的问题。2015年植被盖度均值在各个坡向上的差距变小,表明在积极人类活动与当地水热条件耦合作用下,坡向对植被盖度分布的限制作用在逐渐减弱。

[参考文献]

- [1] 赵文智. 河北坝上半干旱/半湿润过渡带土壤水分状况研究[J]. 中国沙漠, 1996, 11(2): 105-111.
- [2] 张军涛, 李哲, 郑度. 基于可拓工程方法的生态地理区域系统界线划分研究: 以中温带半湿润、半干旱区为例[J]. 地理学报, 2001, 56(1): 24-31.
- [3] 张耀存, 张录军. 东北气候和生态过渡区近50年来降水和温度概率分布特征变化[J]. 地理科学, 2005, 25(5): 561-566.
- [4] 许冬梅, 王堃, 龙澍普. 毛乌素沙地南缘生态过渡带植被和土壤的特性[J]. 水土保持通报, 2008, 28(5): 39-43.
- [5] 戴军虎, 王梦麦, 王焕炯, 等. 近50年中国西北东部半湿润半干旱过渡带气候变化及生态影响[J]. 第四纪研究, 2009, 29(5): 920-930.
- [6] 郑度. 黄秉维与中国综合自然区划研究[C]//自然地理综合研究: 黄秉维学术思想探讨. 北京: 气象出版社, 1993.
- [7] 张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东北地区主要植被类型NDVI变化与气候因子的关系[J]. 生态学报, 2001, 21(4): 522-527.
- [8] 罗玲, 王宗明, 宋开山, 等. 1982—2003年中国东北地区不同类型植被NDVI与气候因子的关系研究[J]. 西北植物学报, 2009, 29(4): 800-808.

- [9] 毛德华,王宗明,宋开山,等.东北多年冻土区植被NDVI变化及其对气候变化和土地覆被变化的响应[J].中国环境科学,2011,31(2):283-292.
- [10] 冯敏,孙艳玲,刘斌,等.华北地区植被NDVI与不同气候指标的相关分析[J].水土保持通报,2014,34(1):246-251.
- [11] 赵舒怡,宫兆宁,刘旭颖.2001—2013年华北地区植被覆盖度与干旱条件的相关分析[J].地理学报,2015,70(5):717-729.
- [12] 刘斌,孙艳玲,王中良,等.华北地区植被覆盖变化及其影响因子的相对作用分析[J].自然资源学报,2015,30(1):12-23.
- [13] 梁四海,陈江,金晓媚,等.近21年青藏高原植被覆盖变化规律[J].地球科学进展,2007,22(1):33-40.
- [14] 徐兴奎,陈红,Levy Jason K.气候变暖背景下青藏高原植被覆盖特征的时空变化及其成因分析[J].科学通报,2008,53(4):456-462.
- [15] 张戈丽,欧阳华,张宪洲,等.基于生态地理分区的青藏高原植被覆盖变化及其对气候变化的响应[J].地理研究,2010,29(11):2004-2016.
- [16] 焦超卫,赵牡丹,汤国安,等.基于GIS的植被空间格局特征与地形因子的相关关系:以陕西耀县为例[J].水土保持通报,2005,25(6):19-23.
- [17] 周旭,张斌,刘刚才.元谋干热河谷近30年植被变化遥感监测[J].长江流域资源与环境,2010,19(11):1309-1313.
- [18] 蔡宏,何政伟,安艳玲,等.基于RS和GIS的赤水河流域植被覆盖度与各地形因子的相关强度研究[J].地球与环境,2014,42(4):518-524.
- [19] 李常斌,王帅兵,杨林山,等.1951—2010年洮河流域水文气象要素变化的时空特征[J].冰川冻土,2013,35(5):1259-1266.
- [20] 杨林山,李常斌,王帅兵,等.气候变化和人类活动对洮河流域植被动态的影响研究[J].资源科学,2014,36(9):1941-1948.
- [21] 邢著荣,冯幼贵,杨贵军,等.基于遥感的植被覆盖度估算方法述评[J].遥感技术与应用,2009,24(6):849-854.
- [22] 陈晋,陈云浩,何春阳,等.基于土地覆盖分类的植被覆盖率估算亚像元模型与应用[J].遥感学报,2001,5(6):416-422.
- [23] 游浩妍,骆成凤,刘正军,等.基于MODIS植被指数估算青海湖流域植被覆盖度研究[J].遥感信息,2012,27(5):55-60.
- [24] Danaf M, Tinam B L, Alex C, et al. Using NDVI to assess vegetative land cover change in central Puget Sound [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 114(1/3):85-106.

(上接第 307 页)

[参 考 文 献]

- [1] 杨志鹏,李小雁,孙永亮,等.毛乌素沙地沙柳灌丛降雨截留与树干茎流特征[J].水科学进展,2008,19(5):693-698.
- [2] 徐立岗,周宏飞,李彦,等.中国北方荒漠区降水稳定性与趋势分析新疆气候变化及短期气候预测[J].水科学进展,2008,19(6):792-799.
- [3] 章文波,刘宝元.北方农牧交错带降水极值变化空间特征[J].自然资源学报,2003,18(3):274-280.
- [4] 郭化文,魏牲生,陈建昌.应用特征系数法求算长时段最大概率降雨强度[J].气象,1997,23(4):9-12.
- [5] 汪青春,李林,刘蓓.青海省近40a雨日、雨强气候变化特征[J].气象,2005,31(3):69-72.
- [6] 姚莉,赵声蓉,赵翠光,等.中国中东部逐时雨强时空分布及重现期的估算[J].地理学报,2010,65(3):69-72.
- [7] 崔丽娜,史玉光,崔彩霞,等.GPS遥感塔克拉玛干沙漠腹地水汽含量与降水关系[J].环境科技,2011,24(1):22-28.
- [8] 俞亚勋,王劲松,李青燕.西北地区空中水汽时空分布及变化趋势分析[J].冰川冻土,2003,25(2):149-156.
- [9] 王宝鉴,黄玉霞,陶建红,等.西北地区大气水汽的区域分布特征及其变化[J].冰川冻土,2006,28(1):15-21.
- [10] 赵芬,吴志勇,陆桂华.塔里木河流域空中水汽状况分析[J].中国科技论文在线,http://www.paper.edu.cn.
- [11] 杨青,刘晓阳,崔彩霞,等.塔里木盆地水汽含量的计算与特征分析[J].地理学报,2010,65(7):853-862.
- [12] 肖开提·多莱特.新疆降水量级标准的划分[J].新疆气象,2005,28(3):7-8.
- [13] 唐冶,陈春艳,赵克明.伊宁市1991—2011年降雨特征分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(6):41-46.
- [14] 王世杰,杨莲梅,史玉光.乌鲁木齐1991—2010年降雨特征分析[J].中国沙漠,2012,32(2):509-516.
- [15] 张家宝,邓子凤.新疆降水概论[M].北京:气象出版社,1987:229-232.
- [16] 何清,向鸣,李立.塔克拉玛干沙漠腹地一次强降水天气分析[J].干旱区研究,1998,15(1):15-20.
- [17] 王敏仲,于坤.浅析塔克拉玛干沙漠降水云系特征及演变规律[J].新疆师范大学学报:自然科学版,2007,26(3):193-194.