

文章编号: 1000-0240(2007)04-0617-09

10 ka BP 来石羊河流域气候演变特征分析

徐启运, 郭慧, 尹宪志, 徐文君,
史志娟, 黄涛, 奚立宗

(中国气象局 兰州干旱气象研究所 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要: 根据石羊河流域及周边地区的大量研究结果分析, 整理和建立了 10 ka BP 来石羊河流域气候演变序列, 可以划分出主要的 7 个气候湿润期和 6 个干旱期。近 50 a 以来石羊河流域气候干旱化趋于显著, 有 4 个主要特点: 1971—2000 年比 1951—1980 年平原绿洲地区年平均降水(气温)增加(正常); 高山和沙漠边缘地区降水量减少(气温正常或偏高); 大部分地方年平均蒸发量普遍减少 10~131 mm; 年平均沙尘暴、雷暴日数减少。

关键词: 石羊河流域; 气候演变; 分析研究

中图分类号: P467 **文献标识码:** A

0 引言

石羊河是甘肃省三大内陆河流之一, 随着石羊河流域内人口增加和全球气候变化的影响, 其森林覆盖率下降, 冰川雪线上升, 以及地下水过量开采, 使石羊河流域农业生产条件和生态环境面临着严峻的形势。由石羊河滋润的民勤绿洲自然生态体系, 因干旱和沙漠化的影响, 也处于濒临崩溃的边缘, 将有可能变成第二个罗布泊。王浩等^[1]根据生态环境保护准则, 对石羊河流域生态需水预测, 其 1995 年为 $1.26 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2000 年为 $1.65 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2010 年为 $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$, 2020 年为 $2.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由此可见, 未来水资源需求增长过快, 必然会进一步加剧石羊河流域水资源供需矛盾, 石羊河流域社会经济的发展面临着严峻的科学问题和社会问题。所以, 深入研究石羊河流域气候和水资源变化, 对保护生态环境, 保护民勤绿洲, 促进石羊河流域社会经济可持续发展, 具有重要的意义。

1 石羊河流域水资源现状

石羊河流域位于甘肃省河西走廊东部, 主要包

括武威市的凉州区、民勤县、古浪县、天祝县乌鞘岭以西的部分地区和金昌市, 流域总面积 $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$, 其中平原区绿洲面积为 20%, 流域内总人口 223.2×10^4 人。石羊河水系发源于祁连山区冷龙岭冰川, 自东向西由大靖河、古浪河、黄羊河、杂木河、金塔河、西营河、东大河和西大河 8 条河流组成。1950 年代石羊河年均径流量为 $17.83 \times 10^8 \text{ m}^3$, 由于气候变暖、人口增加和生态环境破坏, 到 1990 年代年均径流量为 $12.00 \times 10^8 \text{ m}^3$, 比 1950 年代减少了近 $6.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。石羊河源头祁连山区的森林覆盖率由 1950 年代末的 22.4% 减少到目前的 14.4%。水土流失面积达 $2.14 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 每年的泥沙流失量为 $9.30 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。通过多年建设和治理, 该流域目前实际供水总量为 $26.63 \times 10^8 \text{ m}^3$ (其中地表水 $13.95 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水 $12.68 \times 10^8 \text{ m}^3$), 实灌面积 $30.5 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 农业用水量 $24.3 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于上下游多次重复利用及地下水超采, 流域水资源开发利用率高达 154%, 远远超过了水资源和生态环境的承载力。

随着石羊河径流量的减少, 流域上中游地区用水量的增大, 造成石羊河末端的民勤径流量锐减

收稿日期: 2006-12-04; 修订日期: 2007-01-06

基金项目: 国家科技部攻关“西部开发科技行动”重大项目(2004BA901A16); 甘肃省自然科技开发基金项目(3ZS041-a25-013); 中国气象局气候变化专项(CCSP2007-26)资助

作者简介: 徐启运(1952—), 男, 甘肃省正宁人, 高级工程师, 1979 年毕业于兰州大学, 主要从事气候和沙尘暴预测研究。

E-mail: qjxqy@sina.com

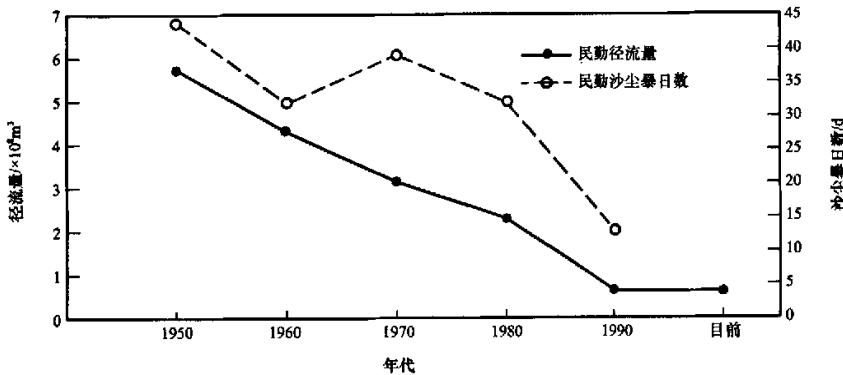


图 1 民勤绿洲径流量和沙尘暴变化

Fig. 1 Ten-year variations of the runoff and the sandstorm days in Minqin oasis of Gansu Province

(图 1), 年径流量从 1950 年代 $5.74 \times 10^8 \text{ m}^3$ 锐减为 1990 年代的 $0.63 \times 10^8 \text{ m}^3$, 目前为 $0.60 \times 10^8 \text{ m}^3$ 左右, 其人均水资源仅为全国的 $1/3$ ^[2-6]。赵军等^[7]研究指出, 由于石羊河流域地下水连年超采, 造成地下水位迅速下降, 武威市已形成了总面积达 900 km^2 , 降深 $10 \sim 20 \text{ m}$ (民勤县一些地方甚至达 40 m) 的地下水位大漏斗。水资源的锐减, 必然造成水质恶化。其中, 民勤绿洲地下水矿化度年平均升高 $0.12 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 湖区地下水矿化度由 1960—1970 年代 $2.00 \sim 3.00 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 上升到 1990 年代的 $5.60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, 部分地区地下水因水质恶化而无法饮用和灌溉, 农业生产条件和生态环境日益恶化。

高前兆等^[8]按照河西地区多年平均降水量等值线图量算及流域面积、现有冰川面积统计估算, 石羊河流域山区平均降水达 450 mm , 除少量降水补充冰川外, 约有 $1/3$ 的降水转化为地表径流; 平原多年平均降水量仅为 130 mm , 已不能形成地表径流, 仅在山前暴雨洪水时有短暂的临时性径流补给地下水。沈永平等^[9]指出, 近 40 a 来祁连山东段石羊河流域冰川物质平衡呈较大负平衡, 在 $-80 \sim -120 \text{ mm}$ 间, 冰川物质平衡的变化直接影响着石羊河径流量的变化。王根绪等^[10]分析认为, 1950 年代以来的 40 a 中, 石羊河流域下游地表水量减少 $4.4 \times 10^8 \text{ m}^3$, 平均年递减流量达 $0.111 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。石羊河地区气温升高、降水减少, 雪线正以年均 $2 \sim 6.5 \text{ m}$ 的速度上升, 有些地区的雪线年均上升竟达 $12.5 \sim 22.5 \text{ m}$, 流域径流量减少, 地下水不能得到补充, 是造成生态环境日趋严重的原因之一。

郭慧等^[11]通过对甘肃河西走廊民勤、武威等 17 个气象站 1958—2003 年的土壤冻结资料分析,

指出气候变暖对河西地区季节冻结影响显著, 冬季最低气温与甘肃河西季节冻结深度和冻结时间关系密切。1980 年代中期是河西地区气候由冷变暖的转折期, 冻土深度由厚变薄, 冻结时间由长变短, 冻土消融的时间提前早。

2 石羊河流域气候演变

大量的研究表明, 石羊河流域曾经孕育了古代文明, 形成了灿烂的地域文化。《尚书·禹贡》记载位于丝绸之路要塞的武威市, 属于九州之雍州, 曾为十六国之前凉, 后凉, 南凉和北凉四朝古都和西夏王朝的陪都。民勤绿洲在历史上也曾是一个沼泽丛生的泽国, 青土湖(原名潴野泽、百亭海)形成于战国时期止于西汉, 《水经注》记载称“碧波万顷, 水天一色”。在 1950 年代初潴野泽也有 100 km^2 的水域面积, 由于气候变化和石羊河中游农业的发展, 潼野泽在 1950 年代后期完全干枯。石羊河地区的气候演变除了受全球气候变化影响外, 还与当地社会经济发展、人口增加、城市化加快、流域绿洲灌溉面积增加、生活和农业等用水量急聚恶化、沙漠化扩大等有关。深入分析石羊河流域和周边地区气候演变, 便于充分利用和开发气候资源, 促进石羊河流域社会经济可持续发展。

2.1 石羊河流域近代气候变化

石羊河流域属冷温带干旱气候, 但各地气候差异比较大。1971—2000 年该地区年平均气温为 $5.3 \text{ }^\circ\text{C}$, 降水量为 249.5 mm (图 2), 相对湿度为 52%, 蒸发量为 1961.7 mm , 日照时数为 2827.7 h , 日照百分率为 64%(表 1), 太阳辐射为 $5600 \sim 5983.6 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

表 1 石羊河流域 1971—2000 年平均气候要素
Table 1 Climate factors in the Shiyang River Basin averaged over 1971 to 2000

站名	气温 /℃	降水 /mm	日照 /%	相对湿度 /%	蒸发量 /mm	大风日数 /d	沙尘暴日数 /d	雷暴日数 /d
乌鞘岭	0.0	405.0	59	58	1521.5	72.3	0.9	40.4
古浪	5.2	361.8	59	52	1783.8	6.0	2.8	20.4
武威	7.9	165.9	65	53	1890.0	9.6	4.8	12.6
民勤	8.3	113.0	69	45*	2623.0	25.0	27.4	9.6
永昌	5.0	201.7	67	51	1990.2	24.6	4.2	18.1
平均	5.3	249.5	64	52	1961.7	27.5	8.0	20.2

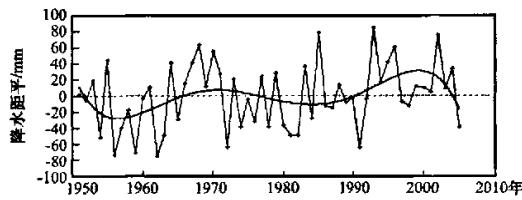


图 2 武威 1951—2005 年平均降水量距平

Fig. 2 The precipitation departure of Wuwei changing with time from 1951 to 2005

陈隆亨等^[12]指出,南部祁连山区属高寒阴湿气候,年平均降水量在 200 mm 以上,最高可达 1 000 多 mm,是石羊河流域水资源的集成区;中部武威绿洲、金昌绿洲和民勤绿洲地区年降水量在 70 ~ 180 mm 之间,气候十分干旱,该地区非灌不植,地尽水耕,是主要农业活动区和水分的消耗损失区,也是受沙漠化危害的主要地区。徐启运等^[13-14]分析指出,石羊河流域下游地区地处巴丹吉林沙漠和腾格里沙漠之间,受特殊地理环境和干旱气候影响,该地区是我国沙尘暴和强沙尘暴多发区之一。根据气象观测资料分析,民勤县年平均沙尘暴日数(图 1)从 1950 年代 44 次降至 1990 年代 13 次;2004 年和 2005 年沙尘暴分别出现 15 次和 10 次,2006 年沙尘暴天气再次增多。周自江等^[15]研究认为,我国北方的典型强沙尘暴事件近年来呈世纪波动性变化。其中,民勤强沙尘暴 1980 年代和 1990 年代强沙尘暴明显多于 1950 年和 1970 年代,2000 年西北东部部分地区的沙尘暴和扬沙日数多于 1990 年代平均值。施祺等^[16]指出,在早全新世气候最湿润阶段,石羊河终端地区仍存在突发性的沙尘暴活动。沙尘暴主要发生在 9 300 ~ 9 100 a BP、8 600 a BP、8 200 a BP 和 7 800 ~ 6 700 a BP,大致具有 400 a 的准周期。其中,早全新世石羊河流域

的沙尘暴活动主要表现为一种自然现象,与石羊河流域所处的大区域环境背景有关。但历史时期以来,特别是现代频繁的沙尘暴活动、人类活动对自然环境的不合理开发和破坏的加重也有密切的关系。

2.2 周边地区气候演变

牟健承等^[17]认为,甘肃省在 10 000 ~ 8 300 a BP 的早全新世是全新世中最冷最干的时期,干旱特别严重;8 300 ~ 3 000 a BP 的中全新世是暖湿阶段,温度比现在高 2.5 ℃ 左右,降水比现在多 50% 左右。3 000 a BP 以来的晚全新世气候冷干,特别是干燥现象明显,期间包括 2 000 ~ 3 000 a 尺度的波动。

周秀骥^[18]认为 3 000 ~ 8 000 a BP 的全新世中期,西北地区曾经是气候比现在暖湿、植被也比现在茂盛的时期,当时的气温要比现在高 3 ℃ 左右,降水量可能比现在多一倍左右,西北的许多内陆湖泊的湖面也较现代高。张德二^[19]、竺可桢^[20]指出我国西北地区近 10 ka BP 来温度变化的轮廓大致为:进入全新世以后气候迅速转暖,气温波动式上升,在 8.5 ~ 3.0 ka BP 出现全新世大暖期,这大暖期的鼎盛阶段在 7.2 ~ 6.0 ka BP。大暖期结束后,气温又呈现波动式的下降,其中 10 ~ 14 世纪一度回暖,出现中世纪暖期,15 ~ 19 世纪进入小冰期,20 世纪气候又再度转暖,气温迅速上升。安成邦等^[21]利用测年结果显示,黄土高原西部的沼泽-湿地相地层形成时代为 9 000 ~ 3 800 a BP,该地层有机质含量很高,水生-湿生类型的蜗牛在该地层中大量出现,指示气候湿润。孢粉记录也表明,从 9 000 a BP 开始,黄土高原西部河谷区植被逐步繁茂,孢粉组合中乔、灌木成分的含量最高可达 80% 以上,气候湿润程度增加。5 900 a BP 以后气候湿润程度

逐渐降低, 3 800 a BP 夏季风强烈衰退, 气候总体趋向干旱。王乃昂等^[22]根据古城废弃、湖泊退缩、频降尘期等发生时代的相对一致性, 确定历史时期河西走廊沙漠化过程存在 3 次大发展时期, 即南北朝、唐末五代和明清两朝, 它们均对应近 2 000 a 来的气候干冷阶段。清代中期河西走廊人口密度突破了干旱地带人口压力的“临界指标”, 水资源利用率超过 40%, 是沙漠化土地迅速扩大的主要原因。康兴成等^[23]利用取自祁连山中部地区的树木年轮样本和该地区 3 个站点的降水资料, 重建了祁连山中部地区的降水量。结果表明: 自公元 904 年以来, 该地区历经了 31 次相对干期和 30 次相对湿润期, 其中, 连续两个 10 a 以上的干期有 17 次, 湿润期 12 次, 最长的干期是 1540—1590 年间; 最长的湿润期是 1240—1270 年、1860—1890 年。世纪尺度范围内, 16 世纪是最干的 100 a, 有 80 a 为少雨年; 最湿润的是 13 世纪和 19 世纪, 这期间有 60 a 为多雨。

2.3 石羊河流域气候演变

根据气象观测资料, 近 50 a 河西平均气温上升了 1.4 °C, 其冬季气温和最低气温升温最明显。通过对石羊河流域近 30 a(1971—2000 年)与前 30 a(1951—1980 年)气候变化比较, 主要有 4 个方面的变化(表 2): 1)除乌鞘岭年平均气温偏高 1.2 °C 外, 石羊河流域其它地区年平均气温正常; 2)除古浪县外, 年平均蒸发量普遍减少 10~131 mm; 3)年平均沙尘暴、雷暴日数等灾害性天气总体呈减少趋势。其中民勤年沙尘暴日数减少 9.9 d, 乌鞘岭雷暴日数减少 125.7 d; 4)平原绿洲地区年平均降水量增加, 高山(乌鞘岭)、沙漠边缘(民勤)地区年平均降水量分别减少 6.3 mm 和 2.0 mm。王宗太^[24]也指出, 我国西北地区从 19 世纪末冷湿的小冰期

结束以来 100 a 左右时间, 处于波动性变暖变干气候环境下, 至 1980 年代中段天山和祁连山东段分别升温 1.3 °C 和 1.0 °C, 而年降水量减少 50~65 mm 和 70~85 mm。陈仁升等^[25]应用小波分析, 对河西地区近 50 a 年降水量和年平均气温的周期分析发现, 石羊河流域年降水量存在 39~41 a、21~25 a、17~18 a、11 a、5~7 a、3 a、2 a 和 4 a 的周期, 年平均气温存在 39~45 a、22~25 a、16 a、10~11 a、6~8 a、4~5 a、2 a、3 a 和 4 a 的周期。

李春虎等^[26]通过对甘肃省 525 a 旱涝等级资料累积等级及跃变分析表明, 甘肃日趋干旱化。其中, 中部和河西地区最严重, 陇东次之, 渭水流域最小。近 200 a 来河西地区气候跃变系数具有与陇东、渭水流域相反的变化趋势。颉耀文等^[27]在大量野外实地考察的基础上, 综合运用历史文献、考古、遥感和地图资料, 广泛搜集近 2 000 a 来民勤盆地绿洲演化的证据。结果表明: 民勤绿洲的开发始于汉代, 繁荣于魏晋, 萧条于南北朝至宋元, 复兴于明清, 鼎盛于现代。绿洲的发展在空间上总体表现为一个自西向东的迁移过程。施雅风等^[28]、李江风^[29]、徐国昌等^[30]指出, 2700~700 a BP 相当历史上的秦汉暖期, 其温度高出 2000 年平均值的 7 °C。在这个暖期, 新疆湖泊发展, 河流水量大, 依据石榴种植推测当时罗布泊地区气温比现在高 1~2 °C; 民勤出现青土湖, 有 109 万军民进入鄂尔多斯高原开垦生活。

朱艳等^[31]通过对石羊河流域终端湖泊边缘三角城剖面湖相沉积物孢粉分析揭示, 该流域全新世初期(10~9.8 ka BP)温度、湿度开始上升, 山上针叶林发育; 9.8—9.2 ka BP 温度、湿度下降, 山上森林萎缩, 山下荒漠范围扩大; 9.2~7.75 ka BP 温度和湿度波动上升, 植被状况逐步好转; 在 7.75

表 2. 1971—2000 年与 1951—1980 年石羊河流域气候变化对比

Table 2 The values of climate elements of the averages over 1971—2000 minus the averages over 1951—1980

站名	气温 /°C	降水 /mm	日照 /%	相对湿度 /%	蒸发量 /mm	大风日数 /d	沙尘暴日数 /d	雷暴日数 /d
乌鞘岭	1.2	-6.3	-1	0	-69.1	27.6	-2.4	-125.7
古浪	0.3	1.1	0	-2	13.9	1.5	-1.3	-111.1
武威	0.2	7.5	-1	0	-131.0	-6.3	-7.4	-105.2
民勤	0.5	-2.0	1	0	-20.9	-2.8	-9.9	-105.0
永昌	0.2	16.6	2	1	-10.4	6.3	-1.2	-111.0
平均	0.5	3.2	0.2	-0.2	-43.5	8.0	-4.4	-111.6

注: 表中数值是 1971—2000 年气象要素平均值减去 1951—1980 年气象要素平均值。

—7.25 ka BP 是短暂的气候冷干、植被恶化阶段, 而 7.25~6.3 ka BP 是植被发育较好的暖湿期。石羊河流域全新世早期气候环境变化具有较强的不稳定性, 每个相对暖湿期和冷干期中都有多个次一级的冷干、暖湿波动, 植被也相应地随之变化。张成君等^[32]根据石羊河流域三角城古湖泊剖面有机质碳同位素组成分析, 指出全新世气候演化主要分为 4 个主要阶段: 暖湿期(10 000~5 000 a BP)、温湿期(5 000~3 800 a BP)、凉湿期(3 800~2 600 a BP)和干早期(2 600 a BP 至今)。施祺等^[33]通过建立石羊河流域尾闾地区湖泊沉积地层年代序列, 指出早全新世 10 000~6 700 a BP 尾闾地区形成外流湖泊, 为流域气候最湿润时期; 全新世中期 6 700 a BP 之后尾闾湖泊退缩并逐步解体, 形成封闭的浅水碳酸盐湖沼环境, 气候出现干旱变化。

朱艳等^[34]通过研究石羊河流域三角城剖面的孢粉组合发现, 8 250~7 750 a BP 是湿润期, 7 750~7 550 a BP 为全新世早期最干燥的时期, 7 550~7 250 a BP 为极度湿润期, 而 7 000~6 800 a BP 却为极干燥期, 反映出全新世早中期气候快速剧烈变化的特点。王乃昂等^[35]以石羊河尾闾青土湖剖面沉积气候记录研究, 证实季风边缘区百年以上时间尺度的气候变化, 具有暖湿和冷干的阶段性特征。自 6 000 a BP 以来, 青土湖全新世中期以来的湖面波动划分为 7 个阶段: 1) 6.0~5.0 ka BP 入湖河流来水量减少, 气候变干, 夏季风南撤; 2) 5.0~3.8 ka BP 流域较多的降水量, 夏季风势力加强北进; 3) 3.8~2.5 ka BP 第三新冰期夏季风南撤, 气候变干冷有关; 4) 2.5~1.72 ka BP 与春秋战国、秦汉温暖气候有关; 5) 1.72~1.37 ka BP 此期湖退过程, 应是魏晋南北朝(220~580 AD)气候变干冷的结果; 6) 1.37~1.07 ka BP 的湖进, 属湖进过程或认为土地利用的产物; 7) 1.07 ka BP 以后的湖退。宋元以来, 全球气候进入现代小冰期, 其气候日见干冷, 至清代前期, 青土湖已分化解体, 并逐渐干涸。其中, 中全新世以来本区至少有 5 期百年尺度左右的降水增多事件, 它们分别是 4.53 ka BP、4.13 ka BP、3.30 ka BP、2.47 ka BP 和 400 年 AD 前后, 并具有暖湿的特点。赵强等^[36]通过对青土湖剖面的代用指标分析, 在 9 500~6 700 a BP 期间为风成砂沉积, 代表了湖泊干涸状态下强烈的风力搬运堆积, 反映为一种暖干的古气候环境; 6 700~5 800 a BP 期间, 为碳酸盐粉砂质粘土沉积, 指示高水位、暖湿的古气候环境; 5 800~2 700

a BP 为碳酸盐粉砂沉积, 反映夏季风减弱, 区域降水量减少。

陈发虎等^[37]认为中国中全新世是一个夏季风盛行的温暖湿润时期, 但在内蒙古西部阿拉善高原的湖泊沉积和湖泊地貌则显示这一区域中全新世气候干旱, 黑河的终端湖泊居延泽、石羊河的终端湖泊瀚野泽和腾格里沙漠东缘的头道湖均经历了湖泊缩小或干涸过程, 石羊河流域, 特别是祁连山地的植被发生显著衰退, 降水减少, 时代为在距今 7 000~5 000 日历年。陈发虎等^[38]利用夏季风边缘区石羊河终端湖泊沉积记录, 发现中国全新世夏季风存有两个大的变化阶段, 早中期夏季风强盛, 晚期干旱。湖泊记录进一步揭示出, 全新世夏季风更多的表现为千百年尺度快速变化, 全新世出现多达 10 次干旱事件。靳立亚等^[39]采用多窗谱分析方法研究了民勤盆地石羊河流域湖泊沉积物所记录的全新世以来气候波动的周期性。结果表明, 该区域的气候变化存在明显的 1 553 a、1 190 a、686 a、617 a、504 a、314 a、180 a 及 131 a 等主要周期。其中, 准 1 500 a 的周期波动在整个全新世石羊河流域气候变化中都有反映, 而 500~700 a 的周期波动在中全新世气候变化过程中起重要作用。

石羊河流域是我国西北内陆干旱区与东部季风的交汇过渡地带和全球变化的敏感区。根据其气候演变受全球气候、青藏高原气候影响和独特的地域气候的影响特点, 在 10 ka BP 以来的气候演变中, 引用竺可桢^[20]等的研究成果并参考周边气候资料^[40~42], 采用专家的研究结论等(表 3), 通过分析整理出 10 ka BP 以来到 2 000 a BP 石羊河流域气候演变序列(图 3)。在这一序列中, 主要有 7 个气候湿润期和 6 个干早期, 即 10 000~7 750 a BP(暖湿)、7 750~7 550 a BP(最干旱)、7 550~7 250 a BP(最湿润)、7 250~6 700 a BP(最干旱)、6 700~5 800 a BP(暖湿)、5 800~5 000 a BP(干冷)、5 000~3 800 a BP(暖湿)、3 800~2 600 a BP(干冷)、2 600~1 720 a BP(暖湿)、1 720~1 370 a BP(干冷)、1 370~540 a BP(暖湿)、540~380 a BP(干冷)、380~50 a BP(暖湿)(图 3)。

近 50 a 以来, 石羊河流域气候在年代际变化方面存在 5 个干(湿)期。即 1951—1964 年(暖干)、1964—1970 年(冷湿)、1970—1990 年(暖干)、1990—2000 年(暖湿), 2000 年至今(暖干)(图 2)。自 1951 年以来, 石羊河流域降水正常(干或偏旱)

表3 石羊河流域10 ka BP以来气候演变序列
Table 3 The climate sequences in the Shiyang River Basin since 10 ka BP

序号	资料地域	气候演变序列					参考资料
		周边地区气候					
1	西北地区	8000 a BP—3000 a BP 8000 a BP—3000 a BP—900 a BP—700 a BP—200 a BP—0 a BP (10世纪) (14世纪) (19世纪) 暖湿(全新世大暖期) 冷干 中世纪暖期 小冰期 转暖					文献[18] 文献[19] 文献[20]
	甘肃省	10000 a BP—8300 a BP—3000 a BP— 冷干 暖湿(全新世大暖期) 冷干					文献[17]
2	黄土高原西部	9000 a BP—5900 a BP—3800 a BP 干旱转向湿润 湿润转向干旱					文献[21]
3	甘肃祁连山	760—730 a BP 460—410 a BP 140—110 a BP (13世纪) (16世纪) (19世纪) 最湿润 最干 最湿润					文献[23]
4	青藏高原冻土	10000 a BP— 全新世大暖期 3000 a BP—1000 a BP—500 a BP—100 a BP—0 a BP 寒冷期 温暖期 小冰期 升温期					文献[42]
5	中国西北	120 a BP—102 a BP—88 a BP—42 a BP—28 a BP—0 a BP (1880年) (1898年) (1912年) (1958年) (1972年) (2000年) 偏暖 偏冷 偏暖 偏冷 偏暖					文献[41]
6	西安旱涝变化	—1640 a BP—1520 a BP—1230 a BP—900 a BP—690 a BP—278 a BP—255 a BP (360年) (480年) (770年) (1100年) (1310年) (1722年) (1745年) 偏湿 偏旱 偏湿 偏旱 偏湿 偏旱 偏湿					文献[19]
石羊河流域气候							
7	10000 a BP—9800 a BP—9200 a BP— (全新世初期) 7750 a BP—7250 a BP—6300 a BP 温度/湿度上升 温度/湿度下降 暖湿 冷干 暖湿 8250 a BP—7750 a BP—7550 a BP—7250 a BP—7000 a BP—6800 a BP 湿润 最干旱 最湿润 干旱 最干旱					文献[31] 文献[34]	
8	10000 a BP— 暖湿 5000 a BP—3800 a BP—2600 a BP— 温湿 凉湿 干旱 0 a BP					文献[32]	
9	10000 a BP— 最湿润 6700 a BP— 干旱 0 a BP					文献[33]	
11	6000 a BP—5000 a BP—3800 a BP— 干旱 湿润 干冷 温暖 干冷 1070 a BP— 1720 a BP—1370 a BP—1370 a BP—1070 a BP— 干冷					文献[35]	
12	9500 a BP—6700 a BP—5800 a BP— 暖干 暖湿 干旱 2700 a BP					文献[36]	
13	49 a BP—36 a BP—30 a BP—10 a BP—0 a BP— (1951年) (1964年) (1970年) (1990年) (2000年) (2005年) 偏少 偏多 偏少 偏多 偏少					本文	

注:图中()中的数字为公元年。

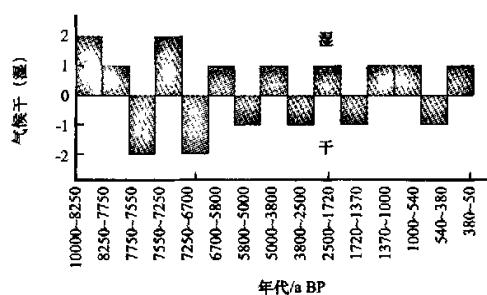


图3 石羊河流域10 ka BP以来气候干(湿)演变

Fig. 3 Variation of the dryness/wetness in the Shiyang River Basin since 10 ka BP

长达39 a，而湿润期只有16 a，干旱气候十分显

著。

3 小结

通过对石羊河流域1971—2000年与1951—1980年气象观测资料比较有4个主要特点：1)年平均气温正常到偏高。乌鞘岭年平均气温偏高1.2℃，高于全国50 a平均值1.1℃；2)除古浪县外，大部分地方年平均蒸发量普遍减少10~131 mm，其中，民勤县年平均蒸发量为降雨量的43.1倍，为全国最干旱地区之一；3)年平均沙尘暴、雷暴日数减少。民勤年沙尘暴日数减少为9.9 d，乌鞘岭雷暴日数减少为125.7 d；4)绿洲中部地区降水量增加，高山(乌鞘岭)和沙漠边缘(民勤)地区年平均降

水量分别减少 6.3 mm 和 2.0 mm, 特别是鸟鞘岭(民勤)年降水量和蒸发量共计减少 75.4(22.9) mm, 相当于当地年均降水量的 18.6(20.3)%。

根据诸多专家关于石羊河流域及周边地区的研究成果, 分析整理 10 ka BP 以来石羊河地区气候演变序列主要有 7 个气候湿润期和 6 个干旱期。自 1951 年以来气候正常(干或偏旱)长达 39 a, 而湿润期只有 16 a, 干旱气候趋于显著。石羊河流域的气候变化存在明显 1 553 a、1 190 a、686 a、617 a、504 a、314 a、180 a 及 131 a 等超长周期。其中准 1 500 a 的周期波动在整个全新世石羊河流域气候变化中都有反映, 而 500~700 a 的周期波动在中全新世气候变化过程中起重要作用。年降水量存在 39~45 a 的较长周期, 21~25 a 和 16~18 a 的中长周期, 10~11 a 左右的中短周期, 6~8 a 的较短周期, 以及 3 a、2 a 和 4 a 的短周期。

参考文献(References):

- [1] Wang Hao, Chen Minjian, Qin Dayong, *et al.* Study on Rational Location and Carrying Capacity of Water Resources in Northwest China [M]. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 2003: 6~8. [王浩, 陈敏建, 秦大庸, 等. 西北地区水资源合理配置与承载能力研究[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2003: 6~8.]
- [2] Lei Zhidong, Yang Shixiu, Wang Zhongjing, *et al.* Water Resources utilization and land desertification in inland arid plain [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(1): 36~40. [雷志栋, 杨诗秀, 王忠静, 等. 内陆干旱平原区水资源利用与土地荒漠化[J]. 水利水电技术, 2003, 34(1): 36~40.]
- [3] Shen Dajun, Cui Lijuan, Jiang Sumei. Institutional causes and countermeasures for water problems in Shiyang River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(2): 293~299. [沈大军, 崔丽娟, 姜素梅. 石羊河流域水资源问题的制度原因及对策[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 293~299.]
- [4] Wang Duoyao, Jiang Zhirong, Ji Yongfu. The eco-environmental problems and integrated construction suggestions in Shiyang Valley [J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2005, 30(2): 5~9. [王多尧, 蒋志荣, 纪永福. 石羊河流域生态环境问题及综合整治意见[J]. 甘肃林业科技, 2005, 30(2): 5~9.]
- [5] Xie Jizhong. Water resources problems and water-saving strategies in Hexi Corridor [J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(6): 802~808. [谢继忠. 河西走廊的水资源问题与节水对策[J]. 中国沙漠, 2004, 24(6): 802~808.]
- [6] Xue Xian, Wang Tao, Yao Zhengyi, *et al.* Sandy desertification status and region development in Shiyanghe River Basin [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(5): 682~688. [薛娴, 王涛, 姚正毅, 等. 从石羊河流域沙漠化土地分布看区域协调发展[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 682~688.]
- [7] Zhao Jun, Wang Xueping, Jin Rong. Approach to establishing and application of technical system of "Digital Shiyang River" [J]. Yellow River, 2005, 27(6): 6~8. [赵军, 王雪平, 金蓉. "数字石羊河"技术体系建立及应用探讨[J]. 人民黄河, 2005, 27(6): 6~8.]
- [8] Gao Qianzhao, Li Xiaoyan, Wu Yanqing, *et al.* Transformation of water resources in the inland river basins of Hexi Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2004, 26(1): 48~54. [高前兆, 李小雁, 仵彦卿, 等. 河西内陆河流域水資源转化分析[J]. 冰川冻土, 2004, 26(1): 48~54.]
- [9] Shen Yongping, Liu Shiyin, Zhen Lili, *et al.* Fluctuations of glacier mass balance in watersheds of Qilian Mountain and their impact on water resources of Hexi Region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(3): 244~250. [沈永平, 刘时银, 袁丽丽, 等. 鄯连山北坡流域冰川物质平衡波动及其对河西水资源的影响[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 244~250.]
- [10] Wang Genxu, Cheng Guodong, Shen Yongping. Features of eco-environmental changes in Hexi Corridor Region in the last 50 years and comprehensive control strategies [J]. Journal of Natural Resources, 2002(1): 78~85. [王根绪, 程国栋, 沈永平. 近 50 年来河西走廊区域生态环境变化特征与综合治理对策[J]. 自然资源学报, 2002(1): 78~85.]
- [11] Guo Hui, Li Dongliang, Zhang Qiang. Interdecadal variability of seasonal frozen ground depth and its climatic reasons in Hexi Corridor of Gansu [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(4): 503~508. [郭慧, 李栋梁, 张强. 甘肃河西季节冻结深度年代际变化特征及其气候成因分析[J]. 冰川冻土, 2005, 27(4): 503~508.]
- [12] Chen Longheng, Qu Yaoguan, Chen Hesheng, *et al.* The land and water resources and its rational utilization in the Shiyang River Basin [J]. Journal of Desert Research, 1982, 2(4): 56~59. [陈隆亨, 曲耀光, 陈荷生, 等. 石羊河流域生态资源及其合理利用[J]. 中国沙漠, 1982, 2(4): 56~59.]
- [13] Xu Qiyun, Hu Jingsong. Features of spatial and temporal distributions of the dust storms in Northwest China [J]. Quarterly of Journal of Applied Meteorology, 1996, 7(4): 479~482. [徐启运, 胡敬松. 我国西北地区沙尘暴天气时空分布特征[J]. 应用气象学报, 1996, 7(4): 479~482.]
- [14] Xu Qiyun, Zhang Qiang, Zhang Cunjie, *et al.* Research on drought early warning system of China [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(5): 785~789. [徐启运, 张强, 张存杰, 等. 中国干旱预警系统研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5): 785~789.]
- [15] Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2002, 13(2): 193~200. [周自江, 王习文, 牛若芸. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究[J]. 应用气象学报, 2002, 13(2): 193~200.]
- [16] Shi Qi, Chen Fahu. Dust Storm records in Shiyang River drainage during early Holocene [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(3): 257~261. [施棋, 陈发虎. 早全新世石羊河流域沙尘暴活动记录[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 257~261.]
- [17] Mu Jiancheng, Ding Xinghong, Ma Dong. Drought disaster in Gansu China and its countermeasures [J]. Gansu Agriculture, 2001(2): 36~40. [牟健承, 丁兴宏, 马冬. 关于甘肃省干旱灾害发生情况及其对策的报告[J]. 甘肃农业, 2001(2): 36~40.]

- [18] Zhou Xiuji. Focus on research on application of water vapor resource in Northwestern China [N]. Weekly of Scientific News, November 28, 2001. [周秀骥. 应加强开发利用西北地区空中水资源研究[N]. 《科学新闻》周刊, 2001-11-28.]
- [19] Zhang Deer. Historical records of environmental changes and agricultural development in Northwest China [J]. Advance in Climate Change Research, 2005, 1(2): 58-64. [张德二. 历史记录的西北环境变化与农业开发[J]. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 58-64.]
- [20] Zhu Kezhen. The primary study of the last 5 000 years climate changes in China [J]. Science in China, 1973, 16 (2): 168-189. [竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学, 1973, 16(3): 168-189.]
- [21] An Chengbang, Feng Zhaodong, Tang Lingyu. Evidence of humid climate during mid Holocene in western Loess Plateau China [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(21): 2280-2287. [安成邦, 冯兆东, 唐领余. 黄土高原西部全新世中期湿润气候的证据[J]. 科学通报, 2003, 48 (21): 2280-2287.]
- [22] Wang Naiang, Zhao Qiang, Hu Gang, et al. Climatic and humanistic background of desertification process over the last 2000 years in Hexi Corridor [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 95-100. [王乃昂, 赵强, 胡刚, 等. 近 2 ka 河西走廊及毗邻地区沙漠化过程的气候与人文背景[J]. 中国沙漠, 2003, 23(1): 95-100.]
- [23] Kang Xingcheng, Cheng Guodong, Chen Fahu, et al. A record of drought and flood series by tree-ring data in the middle section of Qilian Mountain since 904a. D [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2003, 25(5): 518-525. [康兴成, 程国栋, 陈发虎, 等. 邯连山中段公元 904 年以来树木年轮记录的旱涝变化[J]. 冰川冻土, 2003, 25(5): 518-525.]
- [24] Wang Zongtai. The glacier and environment in the middle sector of Tianshan and the eastern sector of Qilianshan since the Little Ice Age [J]. Acta Geographica Sinica, 1991, 46(2): 160-168. [王宗太. 天山中段及祁连山东段小冰期以来冰川及环境[J]. 地理学报, 1991, 46(2): 160-168.]
- [25] Chen Rensheng, Kang Ersi, Zhang Jishi. Application of wavelet transform on annual runoff, yearly average air temperature and annual precipitation periodic variations in HeXi Region [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16(3): 339-345. [陈仁升, 康尔泗, 张济世. 小波变换在河西地区水文和气候周期变化分析中的应用[J]. 地球科学进展, 2001, 16 (3): 339-345.]
- [26] Li Chunhu, Han Yunxiang, Yao Hui. The climatic features of drought and excessive rain in the history of Gansu and their relation with yields [J]. Journal of Gansu Sciences, 2000, 12 (3): 71-77. [李春虎, 韩永翔, 姚辉. 甘肃省历史旱涝特征与产量的关系研究[J]. 甘肃科学学报, 2000, 12(3): 71-77.]
- [27] Xie Yaowen, Chen Fahu, Wang Naiang, et al. Spatial change of Minqin Oasis in Gansu over the last 2000 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(5): 662-670. [谢耀文, 陈发虎, 王乃昂, 等. 近 2000 年来甘肃民勤盆地绿洲的空间变化[J]. 地理学报, 2004, 59(5): 662-670.]
- [28] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary Study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24 (3): 219-226. [施
- 雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨[J]. 冰川冻土, 2002, 24 (3): 219-226.]
- [29] Li Jiangfeng. Climate of Xinjiang [M]. Beijing: Meteorological Press, 1991: 1-287. [李江风. 新疆气候[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 1-287.]
- [30] Xu Guochang, Yao Hui, Li Shan. Climate Change in Arid and Semi-arid Land of China [M]. Beijing: Meteorological Press, 1997: 1-101. [徐国昌, 姚辉, 李珊. 中国干旱半干旱区气候[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 1-101.]
- [31] Zhu Yan, Ju Tianzhen, Chen, Fahu. Vegetation and environmental changes based on high resolution pollen records in Shiyang River basin, arid lands NW China during early Holocene [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalis Sinica, 2001, 21 (6): 1059-1069. [朱艳, 巨天珍, 陈发虎, 等. 西北干旱区石羊河流域全新世早期植被与环境演化[J]. 西北植物学报, 2001, 21(6): 1059-1069.]
- [32] Zhang Chengjun, Chen Fahu, Shi Qi. Carbon isotopic records of lake organic matter during Holocene climatic variations in the arid-semiarid areas of Northwest China-taking Sanjiaocheng in the drainage area of the Shiyang River as an example [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2000, 20 (4): 93-97. [张成君, 陈发虎, 施祺. 西北干旱区全新世气候变化的湖泊有机碳同位素记录——以石羊河流域三角城为例[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2000, 20(4): 93-97.]
- [33] Shi Qi, Chen Fahu. Dust storm records in Shiyang River drainage during early Holocene [J]. Scientia Geographica Sinica, 2001, 21(3): 257-261. [施祺, 陈发虎. 早全新世石羊河流域沙尘暴活动记录[J]. 地理科学, 2001, 21(3): 257-261.]
- [34] Zhu Yan, Chen Fahu, Madsen D B. The environmental significance of the lake pollen records in Shiyang river drainage and environmental reconstruction of the early Holocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(19): 1596-1602. [朱艳, 陈发虎, Madsen D B. 石羊河流域湖泊孢粉记录的环境意义及早全新世环境重建[J]. 科学通报, 2001, 46(19): 1596-1602.]
- [35] Wang Naiang, Li Jijun, Cao Jixiu, et al. A preliminary research on the climatic records of lacustrine deposits of Qingtu Lake in the last 6000 years [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999, 19(2): 119-124. [王乃昂, 李吉均, 曹继秀等. 青土湖近 6000 年来沉积气候记录研究——兼论四五世纪气候回暖[J]. 地理科学, 1999, 19(2): 119-124.]
- [36] Zhao Qiang, Wang Naiang, Li Xiumei. Environmental Change around the Qingtu Lake since 9 500 a BP [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): et al. 352-359. [赵强, 王乃昂, 李秀梅, 等. 青土湖地区 9 500 a BP 以来的环境变化研究[J]. 冰川冻土, 2005, 27(3): 352-359.]
- [37] Chen Fahu, Wu Wei, Zhu Yan, et al. Drought research based on lake sediment document in Ala Shan Plateau over mid-Holocene [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(1): 1-9. [陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 1-9.]
- [38] Chen Fahu, Zhu Yan, Li Jijun, et al. Abrupt Holocene change of the Asia monsoon at millennial-and centennial-scales: evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(17): 1414-1419. [陈发虎, 朱艳, 李吉均, 等. 民勤盆地湖泊沉积

- 积记录的全新世千百年尺度夏季风快速变化[J]. 科学通报, 2001, 46(17): 1414-1419.]
- [39] Jin Liya, Chen Fahu, Zhu Yan. Holocene climatic periodicities recorded from Lake Sediments in the arid-Si arid areas of Northwestern China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2004, 24(2): 101-108. [靳立亚, 陈发虎, 朱艳. 西北干旱区湖泊沉积记录反映的全新世气候波动周期性变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2004, 24(2): 101-108.]
- [40] Li Dongliang, Liu Dexiang. Climate of Gansu [M]. Beijing: Meteorological Press, 2000, 9: 324-353. [李栋梁, 刘德祥. 甘肃气候[M]. 气象出版社, 2000, 9: 324-353.]
- [41] Wang Shaowu, Dong Guangrong. The Characteristics and Evolution of Environment in Western China [M]. Beijing: Science Press, 2002; 1-242. [王绍武, 董光荣. 中国西部环境特征及其演变[M]. 北京: 科学出版社, 2002; 1-242.]
- [42] Jin Huijun, Zhao Lin, Wang Shaoling, et al. Evolution of permafrost and environmental changes of cold regions in eastern and interior Qinghai-Tibetan Plateau since the Holocene[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(2): 198-210. [金会军, 赵林, 王绍令, 等. 青藏高原中、东部全新世以来多年冻土演化及寒区环境变化[J]. 第四纪研究, 2006, 26(2): 198-210.]

Climate Evolution in the Shiyang River Basin of China since 10 ka BP

XU Qi-yun, GUO Hui, YIN Xian-zhi, XU Wen-jun,
SHI Zhi-juan, HUANG Tao, XI Li-zong

(Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Institute of Arid Meteorology,
China Meteorological Administration, Lanzhou Gansu 730020, China)

Abstract: Based on the study results of water resources, climate and glacier variations in the Shiyang River Basin and its adjacent regions, the features of dryness/wetness evolution since 10 ka BP are investigated and its variation series is built. There are seven wet and six dry climatic phases recognized. Furthermore, there are four features in the main climate change in the last 50 a. It is found that the mean annual precipitation in the oasis in the region from 1971 to 2000 was higher than

that from 1951 to 1980, but the temperature change in the oasis was not evidence. Meanwhile, the precipitation in the edge of the high mountains and the desert decreased evidently, with an increasing temperature. Furthermore, the mean annual evaporation in most of the region had decreased 10~131 mm, the days of the mean annual sand storm and the thunderstorm had decreased too.

Key words: Shiyang River Basin; climate evolution; analysis