

# 黑河流域水循环特征研究\*

侯兰功, 肖洪浪, 邹松兵, 杨永刚, 肖生春

(中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 生态水文和流域科学重点实验室, 兰州 730000)

**摘要:** 为了系统地研究黑河流域的水量平衡, 该文应用 Penman-Monteith 模型和波文比公式估算黑河流域的蒸散发量, 并结合流域的流量观测与已有的研究成果, 首次将流域的大气输送水量与地面水循环结合起来研究分析: 黑河流域上空大气水汽输送净收入量约 288 亿  $m^3$ ; 上游山区为多降水中心, 成为河流的发源地, 降水总量约有 141.68 亿  $m^3$ ; 中下游内陆盆地成为低降水极值中心, 降水总量约有 55.13 亿  $m^3$ ; 黑河流域总蒸散量约为 195.6 亿  $m^3$ , 其中在上游山区蒸散约 95.44 亿  $m^3$  的水分, 中下游蒸散损失的水量达到 100.16 亿  $m^3$ 。结合黑河流域水资源量的时空变化情况, 从分析内陆河水循环主要环节出发, 揭示了黑河流域水循环在山区形成水资源、在中下游内陆盆地散失水资源的特征。

**关键词:** 黑河; 水循环; 特征; 蒸散

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2010)03-0254-05

## Study on the Features of Water Cycle in Heihe River Basin

HOU Lang-gong, XIAO Hong-lang, ZOU Song-bing, YANG Yong-gang, XIAO Sheng-chun,  
(Key Laboratory of Ecohydrology and River Basin Science, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this paper, to study the water balance of Heihe river basin, evapotranspiration of the upper, middle and lower reaches of Heihe river were estimated and analyzed by use of Penman-Monteith model and Bowen ratio formula. Furthermore, the atmospheric moisture transportation and precipitation were analyzed. The net amount of atmospheric moisture transportation was about  $2.88 \times 10^{10} m^3$  over Heihe river basin. The upper reaches of Heihe river was precipitation center, where the total precipitation was about  $1.4168 \times 10^{10} m^3$ , and became the source of the river. In the middle and lower reaches, the inland basin became extremely low precipitation center, and the total precipitation was  $5.513 \times 10^9 m^3$ . In the Heihe river basin, the total evapotranspiration was about  $1.956 \times 10^{10} m^3$ , the total evapotranspiration was about  $9.544 \times 10^9 m^3$  in the upper reaches, and the total was about  $1.0016 \times 10^{10} m^3$  in the middle and lower reaches. Referred to the spatial and temporal change characteristics of water resources in Heihe river, the features of the formation of water resources in mountain area and the scatter and disappear of water resources in the inland basin were revealed mainly through analysis on key links in the water cycle of the interior region.

**Key words:** Heihe river; water cycle; features; evapotranspiration

水循环是联系大气水、地表水和地下水的纽带, 其变化深刻地影响着全球水资源系统和生态环境系统的结构和演变, 影响着人类社会的发展和生产活动。20 世纪 60 年代以来, 在世界面临资源与环境等全球问题的背景下, 联合国教科文组织 (UNESCO) 和世界气象组织 (WMO) 等国际机构,

组织和实施了一系列重大国际科学计划。例如, 国际水文计划 (IHP)、世界气候研究计划 (WCRP) 及其子计划全球能量与水循环实验 (GEWEX)、国际地圈生物圈计划 (IGBP) 及其子计划水文循环的生物圈 (BAHC) 方面等。在这些科学计划中, 水循环在全球气候和生态环境变化中所起的作用, 受到极

\* 收稿日期: 2009-11-25

基金项目: 国家自然科学基金 (40801021); 中国科学院知识创新项目 (KZCX2-XB2-04-03)

作者简介: 侯兰功 (1979-), 男, 安徽淮南人, 在读博士, 主要从事水文与水资源研究。E-mail: soundskyhlg@163.com

大重视,成为各项科学计划共同关注的科学问题<sup>[1]</sup>。在中国西北地区,由于水资源短缺问题,由此导致流域生态环境质量趋于退化和社会经济发展面临的一系列问题,业已引起科学家和国家政府的极大关注<sup>[2-3]</sup>。1995年,在国际地圈生物圈计划中国国家委员会(IGBP2CNC)框架下,成立了IGBP核心计划“水文循环的生物圈方面(BAHC)”中国委员会。国家自然科学基金委员会、科技部、水利部、环境部、林业部等多个部门,业已支持了多项水科学基础研究和与国家需求紧密联系的水资源研究项目。如国家科技部“九五”攻关项目、国家基础研究发展规划项目、西部行动计划项目等。这些项目的开展,为研究中国西部水文循环与水资源时间空间演变规律研究提供了有力的支持。黑河流域是西北内陆典型的干旱、半干旱区,其中游平原区年降水量不足200 mm,下游平原区年降水量少于50 mm,平原区90%的水资源依赖祁连山区补给,而全流域90%的人口和社会经济分布在中游区,以至应该输送给下游区的水资源量被中游区生产和生活用水大量挤占,导致下游区居延海等湖泊干涸,生态环境极度恶化,沙尘暴频发<sup>[4-5]</sup>。客观认识黑河流域水循环特征,已经成为黑河流域水资源可持续利用和下游区生态环境修复所面临的重要科学问题之一。

## 1 自然概况与气候特征

### 1.1 流域概况

黑河发源于祁连山北麓,流经青海、甘肃、内蒙古三省(区),干流长821 km,流域面积约13万 $\text{km}^2$ ,是我国第二大内陆河,也是西北、华北地区重要的绿色源流(见图1)。黑河流域南以祁连山为界,北与蒙古人民共和国接壤,东西分别与石羊河和疏勒河流域相邻。其中60%是戈壁和丘陵山区,平原面积约5万 $\text{km}^2$ 。黑河流域基本处于青藏和蒙新高原的交汇地带,地貌地势西高东低、南高北低。多年以来,黑河流域在人类活动强烈作用和区域气候变化双重驱动下,各类景观元素发生了十分复杂的结构变化和相互转换<sup>[6-8]</sup>,整体景观大致可分为:高山冰雪冻土带、山区植被带、山前绿洲带和荒漠带<sup>[9]</sup>。受青藏高原隆起与周围高大山系的影响,海拔在2 500~4 000 m的高山冰雪冻土带,气温较低,现代冰川、积雪发育;山区植被带海拔2 300~3 400 m,降水较多<sup>[10]</sup>,植被带内森林密布,灌木、乔木茂盛,对山区水源具有涵养作用<sup>[11-12]</sup>,从而使山区成为黑河流域径流主要形成区<sup>[9]</sup>;山前绿洲带海拔1 000~2 000 m,降水较少、气温较高,成为径流的

次要补给区和散失区;而荒漠带海拔1 000~1 500 m,由于区内极端干旱,成为径流的主要散失区。



图1 黑河流域研究区略图

### 1.2 流域分段概况

自祁连山源区,经南部盆地至北部盆地,黑河流域地势由高至低,构成上、中、下游三个属性不同的分区,水资源具有明显的区位分带性。

黑河出山口莺落峡以上为上游区,河道长303 km,海拔高程为1 700~5 564 m,年降水量为300~600 mm,平均350 mm,冰川储量136亿 $\text{m}^3$ ,每年融水量约4亿 $\text{m}^3$ ,是黑河流域的主要产流区和水资源形成源区。

莺落峡至正义峡为中游区,河道长185 km,海拔高程为1 352~1 700 m,两岸地势平坦,光热资源充足,降水量50~200 mm。出山口地表径流水量的80%~90%在山前平原戈壁带入渗补给地下水,地下水年均补给量26.9亿 $\text{m}^3$ 。入渗水量的60%~70%在溢出带通过泉水方式流出地下补给地表水。中游区分布着广阔的人工绿洲和部分盐碱化土地,是黑河流域水资源主要耗水区和调控关键区,同时还承担保障下游区生活、生产和生态用水供给的责任。

正义峡以北为下游区,河道长333 km,海拔高程为912~1 249 m,除河流沿岸和居延三角洲外,大部为荒漠戈壁,年均降水量47 mm,最小年份仅17 mm,气候异常干燥,属极端干旱区,风沙灾害频发,是目前黑河流域严重缺水区和生态环境脆弱区,也是我国北方沙尘暴的主要物源区之一,其生态环境状况依赖于中游区下泄水量多少。

### 1.3 流域气候特征

黑河流域深居内陆,远离海洋,属大陆性气候干旱区,气候的地带性和区域性非常明显。其特点是冬季寒冷漫长,降水少;春季回暖快,干旱多风沙天气;夏季气温高,降水相对集中;全年昼夜温差大。

根据地形,流域可分为 3 个气候带:祁连山高寒半干旱区,年平均气温 < 4℃,无霜期 140 d,年日照时数 2 600 h;走廊冷温带干旱区,年平均气温 5~ 10℃,无霜期 160 d,年日照时数 > 2 800 h,风沙大;北部山地和戈壁沙漠温带特干旱区,年平均气温 6~ 10℃,无霜期 140~ 160 d,年日照时数 2 800~ 3 300 h,降水稀少,温差大,春夏季常有沙尘暴天气出现。

## 2 流域降水量与蒸散发耗水量

### 2.1 蒸散耗水量计算方法

采用作物潜在蒸散量和波文比方法来推算作物的蒸散耗水量。其中潜在蒸散量的计算目前常用的是改进后的 Penman-Monteith 公式<sup>[13]</sup>:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma[900/(T_a + 273)]u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:  $ET_0$  ——每天的参考蒸散发 (mm/d);  $R_n$  ——太阳净辐射 [MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $G$  ——土壤热通量 [MJ/(m<sup>2</sup>·d)];  $\Delta$  ——饱和水汽压曲线斜率 (kPa/℃);  $\gamma$  ——干湿球常数 (kPa/℃);  $T_a$  ——平均大气温度 (℃);  $u_2$  ——2 m 处风速 (m/s);  $e_s$  ——饱和水汽压 (kPa);  $e_a$  ——实际水汽压 (kPa)。

则实际蒸散耗水量可通过下式计算得到:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2)$$

式中:  $ET_c$  ——实际蒸散耗水量 (mm/d);  $K_c$  ——作物系数。Allen<sup>[13]</sup> 等根据不同的植物类型给出了不同的作物系数。

黑河流域下游额济纳绿洲的蒸散耗水量在波文比系统日常观测的基础上运用下式计算得到:

$$ET_c = \frac{1}{\lambda} \frac{R_n - G}{1 + \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e}} \quad (3)$$

表 1 黑河上游降水与蒸散估算

指标	冰川带	冻土寒漠带	高寒草甸带	森林带 <sup>[15]</sup>	山地草原带	荒漠或草原化荒漠带	合计
面积/km <sup>2</sup>	474.64	6274.82	10900	747.22	8802.59	7506.34	34705.61
降水量/亿 m <sup>3</sup>	3.09	37.65	52.32	2.80	30.81	15.01	141.68
蒸散/亿 m <sup>3</sup>	0.00	11.29	30.52	3.29	33.45	16.89	95.44

### 2.3 中游降水量与蒸散耗水量

在黑河流域,中游是人类活动最密集的地区,随着人工绿洲的建设,灌溉面积扩大,在这一区域蒸发蒸腾非常旺盛,当地的降水量远远不能满足蒸散量,所以中游是出山径流的重要消耗区,自身不产流。在黑河中游,出山径流与降水首先补给地下水,然后再以泉水形式出露地表,转换成为地表水,并被人类

式中:  $R_n$  ——太阳净辐射 (W/m<sup>2</sup>);  $ET_c$  ——蒸散发 (mm/d);  $H$  ——感热通量 (W/m<sup>2</sup>);  $G$  ——土壤热通量 (W/m<sup>2</sup>);  $\Delta T$  ——上下空气温度差 (℃);  $\Delta e$  ——上下水汽压差 (kPa);  $\lambda$  ——汽化潜热 (MJ/kg);  $\gamma$  ——干湿球常数 (kPa/℃)。

### 2.2 上游降水量与蒸散耗水量

祁连山的降水影响着山区地表径流、冰雪融水对河流的补给,并直接控制着黑河的水文情势。由于山区降水比较丰富,因而成为黑河中下游地区每年得以更新的地表水资源来源。根据气象、水文多年观测资料,黑河流域山区降水为 200~ 600 mm,降水随高程增加 (10~ 25) mm/100 m。

黑河上游既是径流的形成区,也是水量消耗的重要区。控制山区径流的是降水和蒸发,从山区的降水-径流分析,降水除了形成径流以外,其余的水量主要消耗于山区的蒸发(见表 1)。在高山冰川带,已有的研究表明<sup>[14]</sup>:祁连山冰川以少活动和最少活动为主,东段为负平衡,西段为正平衡。总体来看祁连山冰川物质近似处于动态平衡中,也就是说冰川积累量等于消融量。其积累量主要来源于降雨量,消融量主要为蒸发(或升华)和径流,冰川的平均温度很低,蒸发量(或升华量)很小,一般可以忽略。所以高山冰川带的降水几乎全部转化为径流。在冻土寒漠带,降水量相对丰富,蒸发能力较弱,尽管无植被生长(或者植被较少),但产流率高,年降水的 70% 左右可以转化为径流,径流系数可达 0.7。在那些降水量和热量不能满足乔木林生长的山坡,仅生长灌木林和耐寒、耐干的草本;从森林带以下至草原带和荒漠带,随降水量的减少,植被变得稀疏,甚至裸露,在这些带内降水完全损失于蒸发蒸腾,无径流产生,是上游主要的水量消耗区。

生产生活利用,最终消耗于陆面的蒸发蒸腾。自从黑河分水方案实施以后,中游地区可利用的径流量减少,为了弥补用水量的不足,当地加大了地下水的开采量,使得中游的地下水储量大幅减少。根据计算(见表 2),黑河中游东支包括区域为山丹、民乐、甘州、临泽、高台,年总蒸散耗水量 44.24 亿 m<sup>3</sup>,其中绿洲蒸散耗水量 28.6 亿 m<sup>3</sup>,占中游东支总耗水

量的 64.65%; 荒漠蒸发量 15.64 亿  $m^3$ , 占 35.35%。黑河中游西支包括区域为肃州、嘉峪关, 年总蒸散耗水量 11.4 亿  $m^3$ , 其中绿洲蒸散量 6.52 亿  $m^3$ , 占中游西支总耗水量的 57.19%; 荒漠蒸发量 4.88 亿  $m^3$ , 占 42.81%。黑河中游东西支合计总蒸散耗水量 55.64 亿  $m^3$ , 绿洲合计总蒸散耗水量 35.12 亿  $m^3$ , 占中游总耗水量的 63.12%; 荒漠合计总蒸发耗水量 20.52, 占 36.88%。

表 2 黑河中下游降水与蒸散估算

区域	区域面积/ $km^2$	降水量/ $亿 m^3$	总蒸散量/ $亿 m^3$	绿洲蒸散/ $亿 m^3$	荒漠蒸发/ $亿 m^3$
中游 东支	18693.20	22.90	44.24	28.60	15.64
中游 西支	4874.73	3.13	11.40	6.52	4.88
下游	79845.88	29.10	44.52	18.54	25.98

### 2.4 下游降水量与蒸散耗水量

由于黑河中游水资源过度开发, 拦截泄放至下游的水量, 使下游河道成为季节性水道, 或完全干涸, 减少了向下游输送的淡水资源量, 同时绿洲灌溉和土地开发打破原有土壤盐分平衡, 加上灌溉回归水的影响, 使下游地区水质咸化, 土壤盐碱化, 引起下游天然绿洲生态系统急剧退化; 由于减少了河道行水, 干枯河床遭受风沙影响, 造成风蚀积沙; 并使内陆河终端湖水量减少, 乃至枯竭, 也改变了流域内水量的区域分配。黑河下游地处中国西北极端干旱区, 来自中游的下泄水量与当地的降水几乎全部为蒸散所消耗, 使得下游成为径流的主要散失区。根据计算(见表 2), 下游绿洲区的蒸散发耗水量为 18.54 亿  $m^3$ , 荒漠蒸发耗水量 25.98 亿  $m^3$ , 两项合计得到下游地区年总蒸散耗水量 44.52 亿  $m^3$ , 其中绿洲占 41.64%, 荒漠占 58.36%。

## 3 黑河流域水资源变化时空特征

根据水文站观测资料及无测站小河沟估算数据, 计算了近 50 a 来, 进入黑河流域南盆地(走廊平原区张掖、酒泉盆地)、北盆地(金塔、鼎新盆地)和额济纳盆地的地表径流水资源量。从图 2 可以看出, 进入南盆地的地表水资源量基本保持在多年平均水平(约 35 亿  $m^3$ ), 并从 1980s 以来略有增加; 经过南盆地走廊平原区大规模利用后, 进入北盆地水资源量呈现出逐步减少的趋势, 并在 1990s 急剧减少, 表明近 50 a 来, 走廊平原区人类活动对水资源的开发利用在逐步增强; 最终进入到额济纳盆地的水资源量呈现出与北盆地平行变化的趋势。

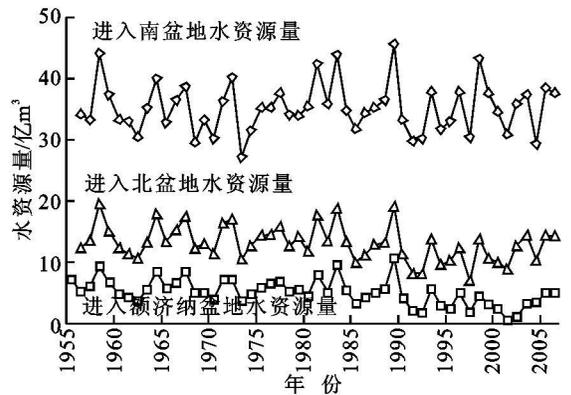


图 2 黑河流域水资源变化时空特征

## 4 结论

由于黑河流域四周为高山高原的地理环境, 形成了干旱地带独具特色的水循环系统, 水资源在流域的水循环中形成、运移、转化和消耗。而且该地区还受不同季风环流的影响, 参与空中的全球水循环<sup>[16][17]</sup>(见图 3)。

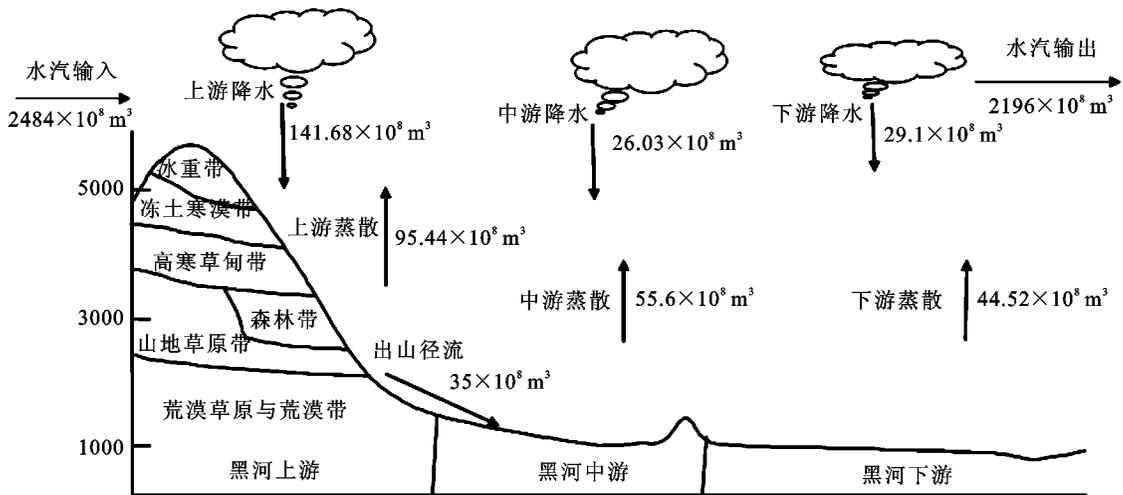


图 3 黑河流域水循环示意图

(1) 降水: 根据已有的研究结果表明<sup>[18]</sup>, 黑河流域上空水汽输入为 2 484 亿  $m^3$ , 而输出水汽为 2 196 亿  $m^3$ , 水汽净收入量为 288 亿  $m^3$ , 按流域总蒸发水量计算, 进入水汽循环水量约为 195.6 亿  $m^3$ , 则本地区有 483.6 亿  $m^3$  的水汽净收入。输送入境的水汽与本地水汽在合适的条件下才形成降水, 受地形抬升和地理位置的影响, 高山降水多于平原, 盆地周边多于盆地腹地, 迎风坡多于背风坡。所以高山是干旱区的“湿岛”, 在高山地区形成多降水中心, 成为河流的发源地。尽管上游山地面积仅占不到 1/4, 但平均每年降落在山区的降水量估算有 141.68 亿  $m^3$ ; 中下游内陆盆地成为低降水极值中心, 尽管降水少, 但由于面积较大, 降水总量约有 55.13 亿  $m^3$ 。

(2) 径流: 山区降水约有 30% 可形成河水、泉水和湖水, 与冰川融水径流汇合成为河川径流的补给源, 成为中下游平原地区人类直接开发利用的地表水资源。山溪径流从河源到出山口沿程增加, 据统计每年向中下游平原地区输送的地表径流约 35 亿  $m^3$ 。流入中下游平原的河水受山前水文地质条件影响, 大量入渗, 并供沿途人类饮用、植物吸收消耗和陆面蒸散, 不断减少。

(3) 蒸散: 蒸散是黑河流域水循环中最重要的过程。通过水面、地下水和地表蒸散, 可使大量的水分散失在开敞的水文循环之中; 另外植物根系可以从土壤中吸收客观水量, 并通过蒸腾汽化大量水分。这种蒸发、蒸腾损失在黑河流域达到 195.6 亿  $m^3$ , 其中在上游山区蒸散约 95.44 亿  $m^3$  的水分, 中下游蒸散损失的水量约达到 100.16 亿  $m^3$ 。

(4) 问题: 黑河流域水资源分配格局的改变, 使得原来大量消耗于下游的河川径流量逐步转移到山前平原绿洲, 增大的平原绿洲蒸发蒸腾水量, 一方面改善了绿洲的局部生态环境, 形成绿洲小气候, 产生绿洲效应; 另一方面, 大量蒸发的水汽在临近高山山麓地带盛行风向的影响下向上运动, 必将有部分向山区输送, 从而参与内陆水分循环, 并形成小部分降水<sup>[19]</sup>。随着全球升温水循环加剧, 这种局地水分循环是否会增加这里的降水量? 其影响的幅度有多大? 这些问题都会影响到黑河流域水资源的合理利用评价。

参考文献:

[1] Dara E, Ghassem R A, Alan K B, et al. An agenda for land surface hydrology research on a call for the Second International Hydrological Decade [R]. Bulletin of the American Meteorological Society, Boston:

1999, 80: 2043-2059.

- [2] 刘昌明, 何希吾. 中国 21 世纪水问题方略[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [3] 肖洪浪, 程国栋. 黑河流域水问题与水管理的初步研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 1-5.
- [4] 范锡朋. 西北干旱地区地下水资源特征及水资源开发利用引起的环境问题[J]. 水文地质工程地质, 1990(1): 3-7.
- [5] 范锡朋. 西北内陆平原水资源开发引起的区域水文效应及其对环境的影响[J]. 地理学报, 1991, 46(4): 415-426.
- [6] 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防治对策[J]. 自然资源学报, 2002, 17(1): 78-86.
- [7] 蒙古军, 李正国. 河西走廊土地利用格局及影响因子研究: 以张掖绿洲为例[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2003, 39(2): 236-243.
- [8] 蒙古军, 吴秀芹, 李正国. 黑河流域土地利用覆被变化(1988-2000) 研究[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2004, 40(4): 922-929.
- [9] 康尔泗, 程国栋, 蓝永超, 等. 西北干旱区内陆河流域出山径流变化趋势对气候变化响应模型[J]. 中国科学(D 辑), 1999, 29(1): 48-54.
- [10] 丁永建, 叶佰生, 周文娟. 黑河流域过去 40a 来降水时空分布特征[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 42-48.
- [11] 傅辉恩, 车克钧. 祁连山(北坡) 森林水文效应的研究[C]// 全国森林水文学学术讨论文集. 北京: 测绘出版社, 1989.
- [12] 王金叶, 车克钧, 闫克林, 等. 祁连山森林覆盖区河川径流组成与时空分布变化分析[J]. 冰川冻土, 1999, 21(1): 59-63.
- [13] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements[Z]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation, 1998.
- [14] 康尔泗, 程国栋, 董曾川. 中国西北干旱区冰雪水资源与出山径流[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [15] 何志斌. 黑河流域植被空间格局及其对尺度的依赖性[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008.
- [16] Andras S, Nagy P N, Gunilla B J. Assessing the world's Freshwater resources [J]. Nature and Resources, 1998, 34(1): 8-18.
- [17] 高前兆, 王润. 中国西北地区的水系统与环境问题[C]// 中国地理学会冰川冻土分会编. 第五届全国冰川冻土大会论文. 兰州: 甘肃文化出版社, 1996: 901-909.
- [18] 江灏, 王可丽, 程国栋, 等. 黑河流域水汽输送及收支的时空结构分析[J]. 冰川冻土, 2009, 31(2): 311-317.
- [19] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 51-131.