

# 沙地地区水文过程及模拟

## ——以秃尾河流域为例

范念念, 吴保生, 田富强

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:**根据气候条件的不同,沙漠可分为沙质荒漠和沙地两种类型。其中沙地地区降水相对丰富,具有降水、蒸发、下渗、产流及汇流等过程的相对完整的水文过程,但已有研究较少。以黄河中游沙地地区的秃尾河为例,分析了沙层水分分布及演化特性,进而将整个水文过程进行概化,得到物理意义明确,结构简单的概念性水文模型。该模型应用方便,精度较高。研究定量地阐明,研究区域沙层孔隙特征决定了沙层水分易保存而不易蒸发,使该地区径流深相对较大,而地下水丰富,调节能力强,是该地区河流径流年内分配均匀,年际变化小的重要原因。流域的非闭合性是该类地区水文研究中需要重点考虑的问题。

**关键词:**沙漠;沙地;水文过程;沙层水分;秃尾河;地下水

**中图分类号:**P333

**文献标识码:**A

**文章编号:**1000-0852(2013)01-0012-06

### 1 引言

沙漠及沙漠化已成为全球面临的重要问题。沙漠可分为两类,一类是荒漠中的沙质荒漠部分,而荒漠是指气候干旱、降水稀少且多变,植被稀疏低矮,土地贫瘠的自然地带;另一类是荒漠地带以外,不少面积被沙丘所覆盖的干草原地带,即通常所说的沙地,但其性质上,尤其在地貌上与沙质荒漠相似,一般习惯上也称为沙漠<sup>[1]</sup>。可见,沙漠可分为沙质荒漠(sandy desert)和沙地(sand land),两者在地貌上相似,但后者比前者所在地区降水丰富。

沙漠地区的水文过程具有重要的研究意义,但不同类型的沙漠,其水文特征具有显著差别。对于沙质荒漠,气候十分干旱,不少地区年均降水量在100mm以下。山区径流在流出山区进入沙漠绿洲后,已没有产汇流,只有发散和消耗了,河川径流是一个水文散耗过程<sup>[2-3]</sup>,对于该类地区,胡和平、雷志栋等以新疆沙漠地区的绿洲灌区为研究区域,建立了干旱区平原绿洲散耗型水文模型,模拟新疆阿克苏河等流域平原区的

径流过程<sup>[3-4]</sup>。而对于沙地,年降水量可达350mm以上,其中不少地区可以形成一般意义上的流域,具有降水、蒸发、入渗、产流及汇流等水文过程。在中国境内,黄河中游的毛乌素沙漠,内蒙古科尔沁沙漠,浑善达克沙漠,乌珠穆沁沙漠等均属于沙地。对该类地区,尚缺乏对完整水文过程机理的认识,更没有能够系统反映水文过程的模型。

本文以黄河中游沙地地区的秃尾河上游流域为研究区域,通过实地考察,并基于已有研究,分析各个水文子过程的机理,建立了一个物理意义明确,可进行连续的降水—径流模拟的概念性水文模型。本工作将有助于进一步认识具有一定降水量的沙漠(即沙地)地区的水文机理,为该类地区的水文研究和水资源开发提供参考依据。

### 2 秃尾河流域自然地理特征

黄河中游北部是毛乌素沙漠(沙地),秃尾河、无定河上游及支流海流兔河等均位于该地区。本文研究区域为秃尾河上游,高家堡水文站为控制站(见图1),流

收稿日期:2011-01-31

基金项目:“973”资助项目(2011CB403304)

作者简介:范念念(1988-),男,山东泰安人,博士生,主要从事水文与泥沙方面的研究。E-mail:fannian7172@126.com

域面积 2 095km<sup>2</sup>,下垫面组成主要为沙地,年均降水量约 400mm,集中在夏季,常以暴雨形式出现。多年平均径流量 2.79×10<sup>8</sup>m<sup>3</sup>,径流深 133mm<sup>[5]</sup>。

为进一步认识沙地地区河流的水文特征,选择云岩河和佳芦河与秃尾河进行对比分析,三条河流均位于黄河中游(见图 1),但下垫面组成有显著差异,各河流流域地表组成与年径流特征如表 1 所示。

各河流多年平均月径流的年内分配过程如图 2 所示。可见,与黄河中游其他河流相比,下垫面为沙地的秃

尾河上游,年径流深较大,径流年内分配均匀,年际变化小。包为民<sup>[6]</sup>、范念念<sup>[7]</sup>及陈兆丰<sup>[8]</sup>等的研究也发现了这种水文特性,这与人们对沙漠的传统认识有很大出入。

### 3 水文过程分析

2009 年 4 月考察发现,沙地表层干沙层很薄,约 2~3cm,不论是在坡顶还是坡底,阴坡还是阳坡差别都不大。该结果与王鸣远的调查结果<sup>[9]</sup>基本一致。

流域内地下水丰富,在考察中发现河流沿岸不断有地下水渗出,河流流量沿程不断增大。根据水分特征,沙层可由上到下分为干沙层、湿沙层和自由水层三层,如图 3 所示,其中自由水层即为地下水库。

这种现象主要是由沙层的孔隙特征造成的。在流域内的神木县锦界镇龙王庙采集沙样,进行筛分,测得沙样主要由细沙和中沙组成,中值粒径为 0.20mm,不均匀系数为 1.92。这样的粒径组成决定了沙层毛管孔隙少而大孔隙多,造成一方面很少形成上升毛管水,阻止了地下水上升,减少了地下水蒸散发损失;另一方面很少保持悬着毛管水,减少了下渗降水中心悬着在毛

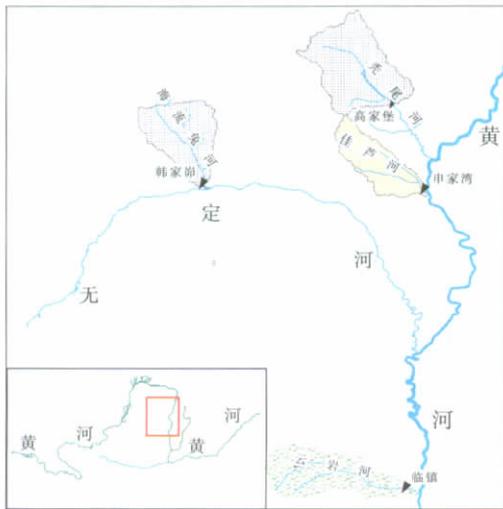


图 1 黄河中游典型支流示意图

Fig.1 The typical tributaries along the middle reach of the Yellow River

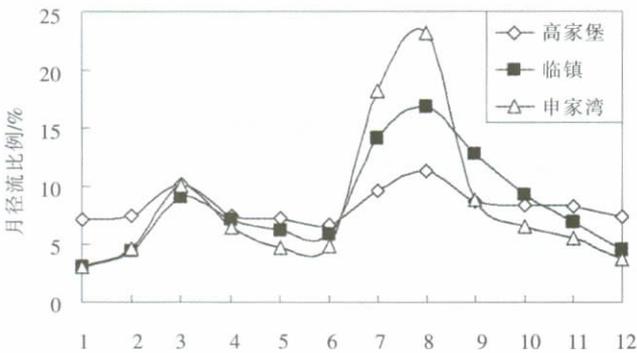


图 2 3 个水文站径流年内分配

Fig.2 Annual runoff distribution of selected hydrologic stations

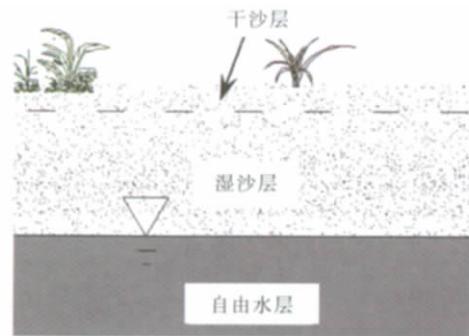


图 3 沙层水分示意图

Fig.3 A general view of the sand layers

管中的损失量。上层覆盖的干沙层减少了湿沙层和自由水层的水分蒸散发。由于干沙层很薄,且沙漠植被稀少,截留量小,降水容易补充干沙层的结合水和薄膜水。中间的湿沙层虽几乎没有毛管水,但结合水和薄膜水是饱和的,通过湿沙层的渗水几乎没有损失,容易

表 1 各河流年径流特征<sup>[14]</sup>

Table1 Annual runoff characteristics of selected rivers

河流	水文站	主要地表组成	控制面积 /km <sup>2</sup>	年径流 C <sub>v</sub>	年径流深 /mm	径流不均匀系数 C
秃尾河	高家堡	沙漠	2095	0.24	133.0	0.163
云岩河	临镇	森林	1121	0.36	18.7	0.487
佳芦河	申家湾	黄土	1121	0.52	60.1	0.713

进入下层的自由水层。

这种产流机制可以尽可能地减少截留、填洼和包气带水分的损失,使尽可能多的降雨转化成径流,且大部分为出流均匀的地下径流,对干旱地区是十分有利的。杨跃文对乌珠穆沁沙漠的研究也发现了干沙层,以及沙地地下水丰富,多有地下水出露的现象,并指出一定厚度干沙层阻碍了下层水汽向上运动,正是由于干沙层的存在,大大减少了沙地土壤水分的散失,使得沙丘在某种意义上成为一个储水体<sup>[10]</sup>。

该地区河流径流特征与以超渗产流<sup>[11]</sup>为主的黄土覆盖区河流相比有显著差异。基于上述分析,形成这种差异的主要原因是由于沙漠地区下渗能力很强,超渗径流很难产生,雨水下渗进入地下,而地下径流调节能力强。由于干沙层薄,降水容易补充地下水,因此,可用类似于湿润地区的蓄满产流机理来描述沙漠地区的水文特征,而与一般湿润地区的水文模型相比,又有以下不同:(1)沙层下渗能力强,沙层中毛管空隙少而大孔隙多,沙中水分易保存而不易蒸发,减少了水分在包气带的损失,对土壤水分的变化过程可以做更简单的概化;(2)研究流域下垫面特征分布相对均匀;(3)沙地地区流域间水量交换量较大,流域的非闭合性需要考虑。

#### 4 模型建立

将整个水文过程概化为蒸发产流、水源划分和汇流三个子过程,进而建立模型。而流域内的河流、湖泊等水面蒸发产流特征与沙地差别很大,将水面和沙地分开研究,模型结构如图4所示。

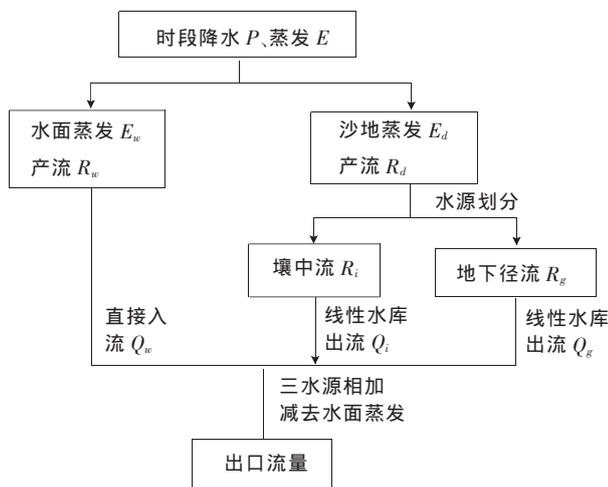


图4 模型结构框图  
Fig.4 The model structure

#### 4.1 蒸发和产流

流域蒸发能力  $E_p$  (mm)是指流域充分供水时的蒸发量,常利用蒸发皿蒸发量反映:大量实验资料表明<sup>[14]</sup>:

$$E_p = K_c \cdot E_0 \quad (1)$$

式中: $E_p$  (mm)为流域蒸发能力; $E_0$  (mm)为蒸发皿蒸发量; $K_c$ 是蒸发皿折算系数。

基于新安江模型<sup>[14]</sup>的蒸发计算方法,对沙地蒸发量和产流量计算作以下设定:设沙地干沙层最大持水量为  $W_m$  (mm),深层耗散系数为  $C$ ,某一时段初干沙层含水量为  $W_1$  (mm),通过时段内的流域蒸发能力  $E_p$  (mm),可以计算时段蒸发量  $E_d$  (mm)、产流量  $R_d$  (mm)和时段末干沙层含水量  $W_2$  (mm)。

若时段内没有降水,产流量为0。对于蒸发,先蒸发干沙层水,若干沙层水不足则蒸发壤中流或地下水库蓄水,具体分两种情况:

$$(1) \text{ 当 } \frac{W_1}{W_m} \geq C \text{ 时}$$

$$E_d = \frac{W_1}{W_m} \cdot E_p \quad (2)$$

$$W_2 = W_1 - E_d \quad (3)$$

这种情况下蒸发不对壤中流和地下水产生影响。

$$(2) \text{ 当 } \frac{W_1}{W_m} < C \text{ 时}$$

$$E_d = C \cdot E_p \quad (4)$$

$$W_2 = 0 \quad (5)$$

这种情况下蒸发将对壤中流或地下径流产生影响。

若时段内有降水量  $P$  (mm),降雨先补充干沙层缺水,再蒸发,若有剩余则下渗补充地下水,具体分以下三种情况:

$$(1) \text{ 当 } P + W_1 - E_p > W_m \text{ 时}$$

$$E_d = E_p \quad (6)$$

$$R_d = P + W_1 - E_p - W_m \quad (7)$$

$$W_2 = W_m \quad (8)$$

$$(2) \text{ 当 } P + W_1 - E_p < W_m, \text{ 且 } \frac{P + W_1}{W_m} > C \text{ 时}$$

$$E_d = \frac{P + W_1}{W_m} \cdot E_p \quad (9)$$

$$R_d = 0 \quad (10)$$

$$W_2 = W_1 + P - E_d \quad (11)$$

$$(3) \text{ 当 } \frac{P + W_1}{W_m} < C \text{ 时}$$

$$E_d=E_p \quad (12)$$

$$R_d=0 \quad (13)$$

$$W_2=0 \quad (14)$$

对于水面,时段蒸发量  $E_w$  和时段产流量  $R_w$  为

$$E_w=E_p \quad (15)$$

$$R_w=P \quad (16)$$

## 4.2 水源划分

沙地产生的径流渗入地下,但靠近河网的部分沙地渗水会迅速地进入河网,远离河网的沙地渗水进入地下水库缓慢出流。将沙地产流  $R_d$  分成壤中流  $R_i$  和地下径流  $R_g$  两部分。定义水源划分函数:

$$y=1-(1-x)^{1/b} \quad (17)$$

$y$  轴处假定为河岸,  $0 < b < 1$  时,在  $x \in [0, 1], y \in [0, 1]$  的区域内,若  $b$  趋向于 0,函数曲线趋向于依次通过  $(0, 0)$ 、 $(0, 1)$  和  $(1, 1)$  的折线,若  $b$  趋向于 1,函数曲线趋向于直线  $y=x$ 。

设某时段沙地产生的径流  $R_d$  为 1 个单位,以水源划分函数曲线为界,左上部分为汇流速度较快的壤中流  $R_i$ ,右下部分为汇流速度较慢的地下径流  $R_g$ ,对水源划分函数积分可求得  $R_g=1/(b+1)$  及  $R_i=b/(1+b)$ 。

这种概化直观地划分了水源。因地下水运动遵循达西定律,满足线性关系,故  $R_d$  大小并不影响  $R_g$  和  $R_i$  的分配比例。

## 4.3 汇流

由以上概化,沙漠产生的降雨径流由三部分组成,即水面产生的径流  $R_w$ ,沙地产生的壤中流  $R_i$  和地下径流  $R_g$ 。设流域面积为  $F(\text{km}^2)$ ,水面面积占流域面积的比例为  $IM$ ,因  $R_w$  直接进入河网,故水面径流总入流

$$Q_w(t)=IM \cdot U \cdot R_w \quad (18)$$

式中: $Q_w$  为水面径流总入流,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $U$  为单位换算系数

$$U=\frac{F}{3.6 \Delta t} \quad (19)$$

式中: $\Delta t$  为计算时段,  $\text{h}$ 。

$R_i$  和  $R_g$  的汇流均利用线性水库演算法计算,具体分三种情况:

(1)若在蒸发产流计算中,  $\frac{W_1}{W_m} \geq C$ ,则只蒸发干沙层水,不对壤中流和地下径流产生影响,有

$$Q_i(t)=C_i \cdot Q_i(t-1)+(1-C_i) \cdot R_i \cdot U \cdot (1-IM) \quad (20)$$

$$Q_g(t)=C_g \cdot Q_g(t-1)+(1-C_g) \cdot R_g \cdot U \cdot (1-IM) \quad (21)$$

式中: $Q_i$  和  $Q_g$  分别为壤中流总入流和地下径流总入

流,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $C_i$  和  $C_g$  分别为以  $\Delta t$  为时段的壤中流水消退系数和地下水消退系数。

(2)当  $\frac{W_1}{W_m} < C$ ,且  $Q_i(t-1) > 0$ ,认为蒸发将消耗壤中流,壤中流总入流计算为

$$Q_i(t)=C_i \cdot Q_i(t-1)+(1-C_i) \cdot (R_i-E_d) \cdot U \cdot (1-IM) \quad (22)$$

地下径流总入流仍按式(21)计算。

(3)当  $\frac{W_1}{W_m} < C$ ,且  $Q_i(t-1)=0$ ,认为蒸发将消耗地下径流,地下径流总入流为

$$Q_g(t)=C_g \cdot Q_g(t-1)+(1-C_g) \cdot (R_g-E_d) \cdot U \cdot (1-IM) \quad (23)$$

这种情况下若时段不产流,  $Q_i=0$ ,若产流,  $Q_i$  按式(20)计算。

沙地地区流域的非闭合性影响很大,须加以考虑。 $Q_g$  除以  $1+Side$  为地下水总入流量。若  $Side$  大于 0,表示本流域向外流域补充地下水,若  $Side$  小于 0,表示外流域向本流域补充地下水。流域出口的流量过程等于上述三种水源入流减去水面蒸发

$$Q(t)=Q_w(t)+Q_i(t)+\frac{Q_g(t)}{1+Side}-E_w \cdot U \cdot IM \quad (24)$$

式中: $Q(t)$  为流域出口处的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

## 5 模型应用实例

### 5.1 模型应用

一个新的水文模型往往需要数十年的气象、水文资料进行验证。但由于研究区域观测资料较少,且 1967 年以后流域内引水量明显增大,难以得到还原后的资料,暂只利用 1966 年 5 月 1 日至 1967 年 12 月 31 日的资料,模拟旬径流过程。

雨量站在非汛期只有日降水资料,采用雨量时间降尺度模型<sup>[12-13]</sup>得到更短时段的降水资料,并通过分析每个区内具有代表性的实测降雨资料来获取各个区内日降雨强度与小时降雨强度的内在联系<sup>[15-16]</sup>。

由于计算是从非汛期开始的,因此初始干沙层含水量  $W$  设为 0,初始  $Q_i$  也设为 0,初始  $Q_g$  为高家堡站流量加上当日水面蒸发造成的流量损失。水面面积所占比例  $IM$  通过流域地貌资料获取,为 0.01<sup>[14]</sup>。

采用遗传算法进行参数率定,得到的参数值如表 2 所示。旬径流的模拟值和实测值如图 5 所示。

为了定量确定模拟效果,计算 Nash 效率系数

表2 率定参数表  
Table2 Calibration results of parameters

所属模块	参数符号	参数意义	参数值
	$W_m$	干沙层最大含水量/mm	10
蒸发产流	$K_e$	蒸发皿折算系数	0.8
	$C$	深层耗散系数	0.01
水源划分	$IM$	水面面积占流域总面积的比例	0.01
	$b$	水源划分函数方次	0.25
	$C_i$	壤中流日消退系数	0.68
汇流	$C_g$	地下径流日消退系数	0.9988
	$Side$	流域不闭合系数	-0.25

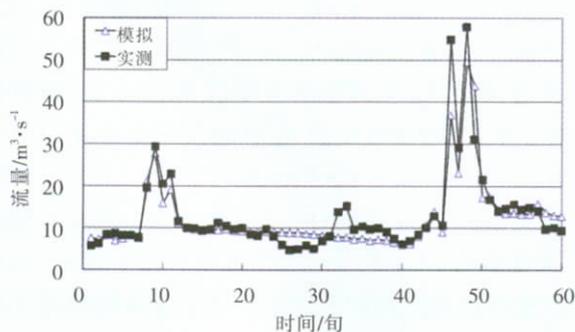


图5 径流模拟值与实测值对比图

Fig.5 Comparison between the simulated and observed data

$$NSC=1-\frac{\sum_{i=1}^n [y_{ci}-y_{oi}]^2}{\sum_{i=1}^n [y_{ci}-\bar{y}_{oi}]^2} \quad (25)$$

式中:  $NSC$  为 Nash 效率系数;  $y_c$  为计算值;  $y_o$  为实测值;  $\bar{y}_o$  为实测值的均值; 单位均为  $m^3/s$ 。

计算得 Nash 效率系数为 0.85。而整个计算期计算和实测的平均流量分别为  $12.4m^3/s$  和  $12.9m^3/s$ , 误差为 3.87%。

## 5.2 误差分析

由图 5 可见, 在 11 月~3 月的模拟结果误差较大, 这是由于秃尾河流域冬季严寒, 封冻期壅水, 流量较小, 而解冻期释放前期冻结的部分水量, 流量较大。由于模型没有考虑河流封冻和解冻问题, 因此在封冻期模拟值偏大, 而解冻期模拟值偏小, 但两时期总水量是平衡的。

此外, 在降水集中的时段模型效果相对较差。这是由于支流洞川沟流域地面组成主要为黄土, 黄土区产流以暴雨时的地表超渗产流为主, 和沙地相比, 产生的地表径流量大, 汇流速度快。

## 5.3 讨论

该模型具有地下水库结构, 可对地下水水量进行动态定量模拟。通过模拟, 计算出经过 1966、1967 两个丰水年的丰沛降水, 秃尾河流域地下水库平均水深由 1966 年 5 月初的 271mm 增加到 1967 年底的 525mm。定量地说明了流域内地下水丰富, 且调节能力很强。

## 6 结论

(1) 沙漠可分为沙质荒漠和沙地两种类型, 沙地地区降水相对丰富, 在一定条件下可以形成完整的流域,

并具有降水、蒸发、下渗、产流及汇流整个水文过程。沙层下渗能力强, 降水几乎全部入渗, 沙层孔隙特征决定了地面表层有一薄的干沙层覆盖于湿沙层表面, 这有利于增大产流量, 对沙漠地区水文过程具有重要意义。

(2) 以秃尾河上游流域的沙地为研究对象, 根据干沙层薄, 缺水量小的水分分布特征, 对适用于湿润区的蓄满产流模式进行修改, 得到了适用于沙地地区的概念性水文模型。该模型结构简单, 概念清晰, 参数物理意义明确, 便于调试及应用。

(3) 应用该研究建立的模型, 对秃尾河上游流域地下水水量的动态变化过程进行了模拟, 定量说明了流域内地下水丰富且调节能力强, 是秃尾河流量过程稳定的重要原因。

(4) 该模型对流域非闭合问题进行了简化处理, 今后需要在不同尺度范围进一步深入研究。此外, 尚需在更多流域更长系列的实测水文资料对模型进行验证。

致谢: 四川大学缪韧老师、梁川教授对此工作提了不少宝贵建议; 李想、梁爽、胡叠等完成了部分工作; 谢金明、张帆、薛小妮等对本文提出了部分修改意见; 游超参与了部分实地考察, 考察过程中得到了薛小妮及其家人的热情接待, 陕西省神木县水利水保局提供了部分资料。对以上单位及个人致以诚挚感谢!

## 参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003. (WU Zheng. Geomorphology of Wind-drift Sands and Their Controlled Engineering[M]. Beijing: China Science Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 胡和平, 汤秋鸿, 雷志栋. 等. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型(I): 模型结构 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (2): 140-145. (HU Heping, TANG Qiu hong, LEI Zhidong, et al. Runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis (1): the model structure[J]. Advances in

- Water Science, 2004, 15(2): 140-145. (in Chinese))
- [3] 汤秋鸿, 田富强, 胡和平. 干旱区平原绿洲散耗型水文模型 (II): 模型应用 [J]. 水科学进展, 2004, 15 (2): 146-150. (TANG QiuHong, TIAN Fuqiang, HU Heping. Runoff-evaporation hydrological model for arid plain oasis (II): applications of the mode[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(2): 146-150. (in Chinese))
- [4] Zhao CS, Shen B, Huang LM, et al. A dissipative hydrological model for the hotan oasis (DHMH0)[J]. Water Resources Management, 2009,23(6): 1183-1210.
- [5] 黄河中游水文水资源局. 黄河中游水文 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005. (Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Upper and Middle Yellow River. Hydrology of Middle Reaches of Yellow River[M]. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Press, 2005. (in Chinese))
- [6] 包为民. 半沙漠流域产流特征与沙漠覆盖面积分析 [J]. 水科学进展, 1998, 9 (2): 130-135. (BAO Weimin. Analysis of runoff formation characters and desert covered area in semi desert basin[J]. Advances in Water Science, 1998, 9(2): 130-135. (in Chinese))
- [7] 范念念. 秀尾河水沙冲淤特征与变化趋势分析 [J]. 西北水电, 2008 (3): 1-4. (FAN Niannian. Analysis of scouring and sedimentation characteristics and trend of Tuwei River [J]. Northwest Hydropower, 2008(3): 1-4. (in Chinese))
- [8] 陈兆丰. 无定河流域的水文特征 [J]. 水文, 1986 (5): 54-58. (CHEN Zhaofeng. The hydrological characteristics of Wuding river basin[J]. Journal of China Hydrology, 1986(5): 54-58. (in Chinese))
- [9] 王鸣远. 水文过程及其尺度响应 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (WANG Mingyuan. Hydrological Progress and Scale Response [M]. Beijing: China WaterPower Press, 2010. (in Chinese))
- [10] 杨跃文. 嘎亥额勒苏沙地沙丘潜水的产状、动态及其与植被的相关性 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009. (YANG Yuewen. Study on Eco-hydrological and Vegetation Distribution Pattern in Sand Land: Taking Gahaielesu Sand Land as an Example [D]. Huhhot: Inner Mongolia University, 2009. (in Chinese))
- [11] 赵人俊. 流域水文模拟——新安江模型与陕北模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984. (ZHAO Renjun. Simulation of Watershed: Xin'an River Model and North of Shaanxi Model [M]. Beijing: China WaterPower Press, 1984. (in Chinese))
- [12] Rebora N, Ferraris L, Hardenberg JV, et al. Rain FARM: rainfall downscaling by a filtered autoregressive model [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 7(4): 724-738.
- [13] Gyasi-Agyei Y, Bin Mahbub SMP. A stochastic model for daily rainfall disaggregation into fine time scale for a large region [J]. Journal of Hydrology, 2007, 347(3-4): 358-370
- [14] 周祖昊, 王浩, 贾仰文, 等. 缺资料地区日均降雨时间上向下尺度化方法探讨——以黄河流域为例 [J]. 资源科学, 2005, 27 (1): 92-96. (ZHOU Zuhao, WANG Hao, JIA Yangwen, et al. Temporal downscaling daily precipitation in lack-data watershed: a case study in Yellow River [J]. Resources Science, 2005, 27(1): 92-96. (in Chinese))
- [15] 贺莉. 黄河中游不同区来水来沙变化与下游河道演变的响应分析 [D]. 北京: 清华大学, 2008. (HE Li. Analysis of Variation of Water and Sediment Yield in Different Source Areas and Its Effect on Fluvial Response in Lower Yellow River [D]. Beijing: Tsinghua University, 2008. (in Chinese))
- [16] 徐建华, 林银平, 吴成基. 等. 黄河中游粗泥沙集中来源区界定研究 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2006. (XU Jianhua, LIN Yinping, WU Chengji, et al. Definition on Source Area of Centralized Coarse Sediment in Middle Yellow River [M]. Zhengzhou: Yellow River Hydraulic Press, 2006. (in Chinese))

## Hydrological Processes and Simulation in Sand Land: A Case Study of the Tuwei River Basin

FAN Niannian, WU Baosheng, TIAN Fuqiang

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Desert can be divided into two types of sandy wilderness and sand land, according to different climate conditions. Sand land has relatively rich precipitation and integrated hydrological processes including precipitation, evaporation, infiltration, runoff yield and flow concentration. However, there is only a little research on the hydrologic processes in sand land. Taking the Tuwei River in the middle reaches of the Yellow River as a case, this paper analyzed water distribution and dynamic evolution in sand layer, and then developed an explicit and simple conceptual hydrologic model. The model is of convenient application and high precision. The results indicated that pore characteristics enable the storage of water without easy evaporation; the runoff distribution is well-proportioned annually and inter-annual variation is slight in this area, which results from plenty of the ground water and strong ability of modulation. The fact that the basin is usually unclosed in sand land must be considered.

**Key words:** desert; sand land; hydrological processes; water in sand layer; Tuwei River; ground water