

黄河中游河口—龙门区间多年平均流域水平衡特征 ——区域蒸散量估算模型验证与下垫面参数校核

张晓萍^{1,2}, 张 棹³, 穆兴民^{1,2}, 李锐^{1,2}

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨陵, 712100;

2. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵, 712100;

3. CSIRO Land and Water, Christian Laboratory, GPO Box 1666, Canberra, ACT, 2601, Australia)

摘要: 采用黄河中游河口镇至龙门区间 1980~2000 年间径流及气象数据, 通过对 Zhang 等 2001 建立的区域 (流域) 多年平均蒸散量估算模型进行验证和下垫面参数校核工作, 探索了干旱半干旱地区水循环要素相应于不同土地覆被类型的结构变化及水平衡特征和规律。结果表明, 由于研究区处于干旱半干旱气候区, 采用原模型及参数对蒸散量的预测能力好于对径流的预测能力。使用优化后的下垫面参数使原模型对河龙区间蒸散量和径流预测能力得以改进, 一致性指标分别从 0.89 和 0.21 提高到 0.94 和 0.63。对实际蒸散量进行预测的相对误差和均方误从 3.6% 和 17.2 mm 减小到 1.5% 和 7.9 mm。对径流进行预测的相对误差从 42.7% 减小到 18.0%。聚类分析和下垫面参数优化结果表明, 河龙区间流域水循环要素变化特征受不同土地覆被影响可以分为 3 个明显不同的区域。由于大面积林地截流蒸发的作用, 南部林地覆被区具有较高蒸发系数, 适用下垫面参数值为 1.61。西北部风沙地貌区受粉沙覆盖层和地下径流补给影响, 使该区蒸发系数较小, 适用值为 0.1。中部典型黄土丘陵覆盖区适用值为 0.45。

关键词: 参数优化; 多年平均; 水平衡特征; 土地覆被; 黄河中游

区域 (流域) 蒸散量 (E) 是受大气、土壤和植被等环境因子影响的复杂过程, Budyko (1958) 指出陆地表面的蒸发量主要受降水量 (P) 和热量 (用潜在蒸发能力 E_0 表示) 的影响。极端干燥条件下, 全部降水将消耗于蒸发, $E/P \rightarrow 1$, $E_0/P \rightarrow \infty$ 。当年降水量很大, 辐射平衡余热全部用于蒸发耗热, $E \rightarrow E_0$, $E_0/P \rightarrow 0$ 。一般地区的实际情况则变化在这两种极端情况之间^[1]。Schreiber (1904)、Budyko (1974)、Pike (1964) 等通过建立一系列降水和热辐射平衡间的经验模型, 来估算区域蒸散量^[2-4], 缺点是没有考虑流域下垫面特征因素影响, 有些情况下会产生严重误差。Milly (1994) 认为区域实际蒸散量决定于降水和潜在蒸发能力, 这个过程受到下垫面水分存储因素影响^[5]。傅抱璞 (1981; 1996) 利用量纲分析和微分方程理论确定并推导了相关计算数学模型, 并考察了中国的山地、平原以及盆地等不同地貌区与地形、植被、土壤及降水性质有关的参数确定方法^[6, 7]。Zhang 等 (2001) 建立了经验模型, 与 29 个国家 257 条流域 (以研究径流对植被变化响应的对比流域和单个流域为主) 数据资料相结合, 获取了模型下垫面参数 w 的适用值及对不同植被类型代表的意义, 可以用来估算区域 (流域) 尺度植被变化前后的蒸散量及其他水循环要素的变化量^[8]。虽然上述经验模型形式不同, 但其解析解非常相近。

基于中国各地近百个山区流域的统计资料, 刘昌明 (1988) 研究了随着降水由小到大, 水量交换方向由垂直方向为主逐渐到以水平方向为主, 表现了气候对区域蒸散量在水量平衡中结构性变化规律的决定作用^[9]。黄河中游主体为黄土高原所在地, 以深厚黄

收稿日期: 2006-11-28; 修订日期: 2007-03-23

基金项目: 中科院西部之光联合学者项目 (2005 年); ACIAR 资助中澳合作项目 (LWR/2002/018) [Foundation: The west bright project of CAS in 2005 and ACIAR funded international cooperated project with Australia, No. LWR/2002/018]

作者简介: 张晓萍 (1971-), 女, 博士, 副研究员, 从事土地利用 / 覆被变化环境效应研究。E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

土、环境脆弱、水土流失严重，水资源贫乏为其环境特点，然而又富藏煤炭、石油、天然气等资源，发展潜力巨大。以往对黄河流域环境演变、径流及泥沙变化特征等研究十分深入细致^[10-14]，从多年平均尺度定量研究黄土高原水循环、水平衡规律和特征却不多见。本文以中澳国际合作项目“澳大利亚马瑞比季流域和中国黄土高原植被重建对水资源影响研究”（2003~2007）为契机，以黄河中游河口龙门区间（简称河龙区间）1980~2000年径流和降水等数据为基础，对 Zhang 等（2001）建立的区域（流域）蒸散量估算模型进行验证和下垫面参数校核工作，期望为探索和分析生态环境脆弱地区的水循环要素对土地覆被变化的响应，认识和把握水循环过程及规律起到相应作用。

1 模型简介

Zhang 等（2001）建立的估算区域（流域）蒸散量的概念模型如下：

$$ET = P \left[\frac{1 + W \frac{E_0}{P}}{1 + W \frac{E_0}{P} + \left(\frac{E_0}{P} \right)^{-1}} \right] \tag{1}$$

式中： P 、 ET 、 E_0 分别为流域多年平均降水量、实际蒸散量和潜在蒸发量，其单位均以 mm 计， w 为无量纲的流域下垫面特征参数。

经过 Zhang 等对世界 257 条流域实测资料进行最小二乘方拟合分析，指出，对森林流域（林地面积超过流域面积的 75%），式中 w 和 E_0 适用值为 2.0 和 1410；对草地流域，式中 w 和 E_0 适用值为 0.5 和 1100（图 1）。

为了使模型以及所确定参数能够在实际流域水量平衡估算中得以应用，Zhang 等（2001）参考 Eagleson（1982）的合理性假设方法，认为，流域总蒸散量可以表示为林地和草地蒸散量的面积加权之和^[15]，即，

$$ET = fET_f + (1 - f)ET_h \tag{2}$$

式中： ET 是流域总蒸散量， f 是流域内林地面积（%）， ET_f 是由式（1）和相应于林地的 w 、 E_0 计算的林地蒸散量， ET_h 是由式（1）和相应于草地的 w 、 E_0 计算的草地蒸散量。从式（2）可知， ET_h 其实代表了林地面积之外所有覆被类型的综合蒸散量。因此，计算 ET_h 的 w 值也表示了林地之外的土地利用和覆被类型所表示的综合下垫面参数。

2 研究区概况及数据

2.1 研究区概况

黄河中游的河龙区间东部以吕梁山为界，西邻北洛河（图 2），面积约 $0.11 \times 10^6 \text{ km}^2$ ，包括陕西、山西、内蒙三省区 50 多个县（市、旗）近 500 个乡镇，人口密度约 83 人 / km^2 。属于干旱半干旱地区，年均气温 6~14 °C，年降水量 300~580 mm。年内降水集中于 5~9 月，空间上则南多北少，山地高于周围丘陵。年蒸发量 1500~2000 mm，是降水量的 3~4 倍。多年平均（1919~1995 年）径流深 68 mm，其地区分布与降水分布不一致，受水文地质和下垫

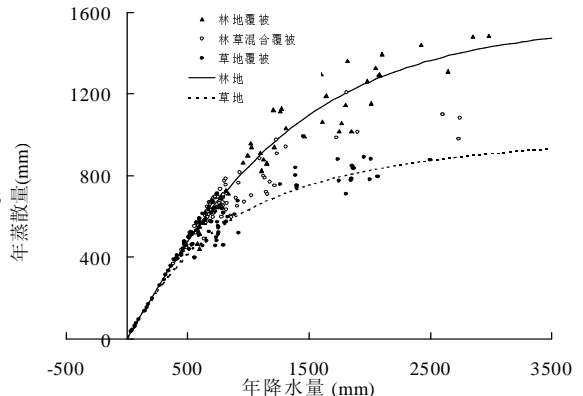


图 1 从 29 个国家 257 条对比流域研究结果拟合的多年平均尺度不同植被覆盖下实际蒸散量随降水变化^[8]
 Fig. 1 Relationships between mean annual ET and rainfall under different unmanaged vegetation categories based on the experiments of 257 catchments from 29 countries^[8]

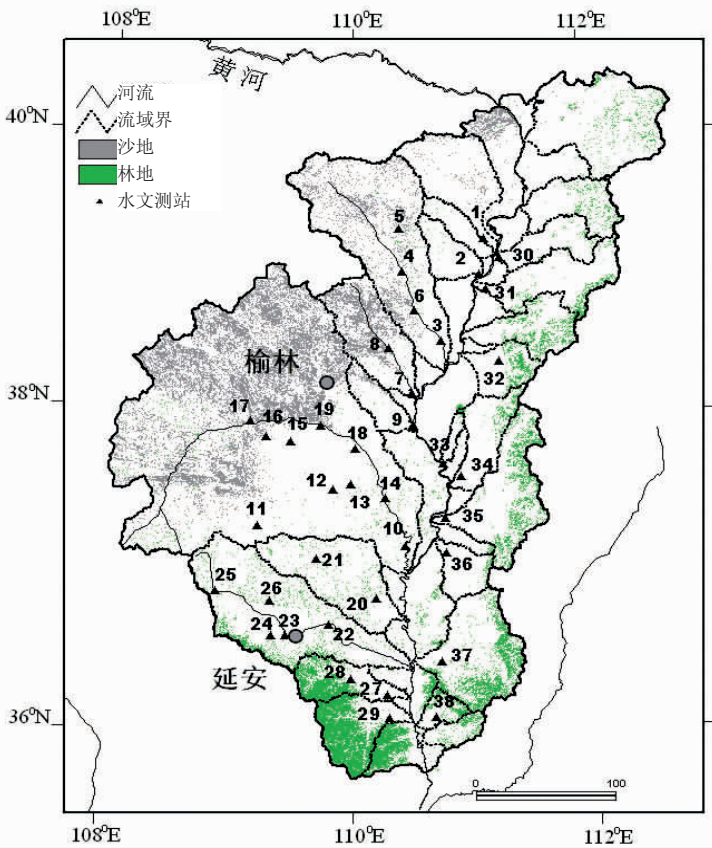


图 2 黄河中游河龙区间主要流域及 38 个水文站及位置

Fig. 2 The main catchments in the He-Long section of the middle Yellow River, and 38 hydrologic stations coded in the research area

面特征影响，呈现西北高、东南低趋势^[14]。据刘昌明等 (1978) 研究^[10]，黄土高原林区年径流深低于 25 mm，显著低于其外围的陕北、晋西等地区，延河以北和黄河的山、陕之间径流深在 40 mm，在无定河上游径流深高达 100 mm。

河龙区间以黄土丘陵沟壑侵蚀地貌为主，海拔在 1100~1500 m 之间，切割深度 100~500 m 不等，陡坡 ($\geq 25^\circ$) 面积在 10%~40%，地表裂度在 30%~70%。西北部是毛乌素沙地，位于鄂尔多斯高原边缘地带，海拔在 1300 m 以上，地势由西北向东南倾斜^[16]，地表以固定沙丘沙地为主，沙丘间或沙地分布有大量的丘间洼地和湖淖滩地，形成干旱草原景观。南部和东部的黄龙山、崂山、吕梁山等低中山地貌，分布着以辽东栎为主的次生落叶阔叶林和温带针叶林、针阔叶混交林 (图 2)。区内黄土层厚达 20~30 m，陕北达 50~60 m，土质疏松，透水性强，抗冲刷力差，水土流失严重。

2.2 数据及处理方法

2.2.1 多年平均流域实际蒸散量 本文采用水量平衡法计算各流域平均实际蒸散量。一个闭合流域内，不考虑相邻区域的水量调入和调出情况下，其水量平衡方程为：

$$ET = P - R \pm \Delta W \tag{3}$$

式中： ET 为流域实际蒸散量 (mm)， P 为流域平均降水量 (mm)， R 为流域径流量 (mm)， ΔW 为流域土壤蓄水变量 (mm)。对于多年平均状况， $\Delta W \approx 0$ ，则年实际蒸散量为年降水量和年径流深之差。

这是计算流域多年平均实际蒸散量较为可靠的方法。用降水量与径流深之差来代表

年实际蒸散量,用以验证模型预测值和实际值的关系。

2.2.2 数据处理 公式(1)中应用潜在蒸发来表示在给定的气候条件下可能产生的最大实际蒸散量。潜在蒸发的估算有多种算法。例如, Budyko (1974) 采用净辐射来近似地估计潜在蒸发^[3]。Zhang 等 (2001) 应用基于辐射能量的 Priestley-Taylor 公式来估算潜在蒸发^[8]。潜在蒸发估算方法系统上的差异,将不会改变公式(1)所表示的函数关系。在本次研究中,则应用该地区气象站普遍具有的小口径蒸发器观测值 (Epan) 来表示当地的潜在蒸发。

降水和潜在蒸发 (Epan) 等气象数据主要来自于河龙区间及周围 58 个县(市、旗)气象站的数据观测,时间从 1980 年 1 月~2000 年 12 月。国际合作项目中,将逐月降水和逐月潜在蒸发采用气象插值软件 ANUSPLIN 分别进行了空间插值处理^[17]。本文则在 ARCGIS 下将各月降水和各月潜在蒸发空间插值面数据累加处理为各年降水和各年潜在蒸发插值面,进而获取 21 年平均降水和潜在蒸发插值面。按照水文站控制区域界线,采用面积加权法逐一获取各水文站控制范围内多年平均降水和多年平均潜在蒸发值(表 1)。

采用的河龙区间 38 个水文站位置如图 2 所示,其控制面积从 187km² 到 29,662 km², 1980~2000 年间平均实测径流深如表 1。多年平均径流系数从秃尾河高家堡站的 30.3%到朱家川下流碛站的 2.5%,地区平均为 8.8%。河龙区间林地面积来源于 1997 年 TM 遥感信息,按照控制区界线,在 ARCGIS 下获取各水文站控制区内林地面积及比例(表 1)。

3 结果与分析

3.1 区域(流域)蒸散量估算模型验证

基于河龙区间 38 个水文站 21 年的平均径流深、降水量数据对 Zhang 等 (2001) 建立的区域(流域)蒸散量模型以及 w 、 E_0 参数值进行了验证(图 3)。图 3a,b 显示出大多数数据点位分布于模型建立的林地蒸散量和草地蒸散量曲线之间,实际蒸散量与模型预测蒸散量关系较好(图 3c),但实测径流与预测径流点位比较分散(图 3d)。模型预测结果与干旱区水循环要素结构以蒸散发为主的特征密切相关。从图 3 中可知,有 2 个数据点位不同于区域其他数据点位,这两个水文站是位于秃尾河的高家堡和高家川水文站,由于受闭流区地下径流补给影响,其径流量要远远大于区域其他水文站。为在随后的数据分析中不受影响,这两个数据在后边参数校核中不予考虑。

3.2 区域(流域)蒸散量模型下垫面参数的校核

Zhang 等 (2001) 采用 257 条流域数据对其概念模型进行回归模拟时,对相应于林、草等覆被类型的 E_0 值也进行了确定。由于太阳辐射等的不同,显然各地潜在蒸发差异巨大,对其下垫面参数的异同进行比较和分析才更有意义。本文则应用河龙区间当地的潜在蒸发数据(即 Epan 值),以及径流、降雨数据,对 Zhang 等 (2001) 模型中的下垫面参数进行了校核工作。

为获取比较精确的 w 值,按照 Zhang 等 (2001) 模型,我们点绘了 36 个水文站干燥指数 ($Epan/P$) 和蒸发系数 (ET/P) 的关系图(图 4)。显示 36 个数据点的分布并不服从某一条曲线,而是基本散布于 $w = 2.0$ 和 $w = 0.1$ 曲线之间。

文章采用聚类分析法寻求这些数据隐含的蒸散发环境的亲疏远近关系。首先将数据标准化处理,将每个站点的干燥指数减去 36 个站点干燥指数均值,再除以 36 个站点干燥指数标准差,得到每个站点的标准化干燥指数。类似地,得到 36 个站点的标准化蒸发系数。采用欧式距离计算个体间距离,采用组间平均联结法,得到聚类分析的树状图(图 5)。图 5 可知,按照标准距离 7 可将 36 个水文站分为 6 组。由图 4b 可以看出,第 4 组和

表 1 黄河中游河龙区间 38 个水文站控制面积、林地面积以及 21 年平均径流深及相应时段降水和潜在蒸发

Tab. 1 The contribution area, percentage of forest cover, average annual stream flow, precipitation and Epan for 38 hydrological stations in He-Long section of the middle Yellow River

流域及水文站	控制面积 (A, km ²)	林地面积 (f, %)	多年平均径流深 (R, mm)	多年平均降水量 (P, mm)	多年平均潜在蒸发 (Epan, mm)
1 皇甫川皇甫	3175	0.04	33.1	365.9	2014
2 孤山川高石崖	1263	0.97	40.7	384.6	2034
3 窟野河温家川	8645	0.87	55.7	361.1	2103
4 窟野河王道恒塔	3839	0.15	40.4	345.8	2151
5 窟野河新庙	1527	0.76	52.8	356.7	2081
6 窟野河神木	7298	0.86	54.6	356.4	2112
7 秃尾河高家川	3253	0.23	89.0	375.0	2055
8 秃尾河高家堡	2095	0.08	111.5	368.4	2072
9 佳芦河申家湾	1121	0.56	37.6	386.3	1995
10 无定河白家川	29662	1.07	33.2	362.2	1997
11 无定河青阳岔	662	0.62	34.3	413.2	1811
12 无定河李家河	807	0.05	30.5	392.1	1897
13 无定河曹坪	187	0.06	38.0	402.5	1903
14 无定河丁家沟	23422	1.00	33.0	347.9	2035
15 无定河殿市	327	0.00	35.7	375.4	1939
16 无定河横山	2415	0.04	21.0	378.4	1917
17 无定河韩家峁	2452	0.00	31.1	316.9	2148
18 无定河马湖峪	371	0.08	37.9	391.0	1929
19 无定河赵石窑	15325	1.32	29.4	342.2	2025
20 清涧河延川	3468	4.97	39.3	455.0	1730
21 清涧河子长	913	3.96	41.3	444.3	1734
22 延河甘谷驿	5891	9.72	34.4	469.7	1665
23 延河延安	3208	4.23	39.0	455.9	1693
24 延河枣园	719	24.77	34.5	488.1	1609
25 延河杏河	479	7.72	37.2	438.7	1720
26 延河安塞	1334	3.77	40.0	445.5	1723
27 云岩河新市河	1662	47.99	20.0	506.7	1607
28 云岩河临镇	1121	65.32	16.2	507.9	1596
29 仕望川大村	2141	72.73	28.2	527.6	1580
30 县川河旧县	1562	4.41	11.1	411.6	1942
31 朱家川下流碛	2881	10.25	10.8	424.3	1943
32 蔚汾河壁村-兴县	650 (兴县站)	33.98	28.2	445.9	1950
33 清凉寺沟杨家坡	283	4.27	31.5	431.1	1947
34 湫水河林家坪	1873	11.03	25.4	447.6	1923
35 三川河后大成	4102	21.09	42.8	470.9	1858
36 屈产河裴沟	1023	6.38	25.7	478.1	1778
37 昕水河大宁	3992	28.20	22.7	483.8	1714
38 周川河吉县	436	37.85	20.9	493.2	1658

第 5 组数据点位于 $w = 2.0$ 曲线附近, 第 1- 第 3 组散布在 $w = 0.1$ 曲线附近, 第 6 组散布于 $w = 0.5$ 曲线附近。综合聚类分析结果, 并参考图 4b, 分别将第 4- 第 5 组合并, 第 1- 第 3 组合并, 与第 6 组一起, 最后形成 3 组数据 (图 4b)。

为了得到相应于这 3 组数据适宜的 w 值, 在已知降水、实际蒸发和潜在蒸发条件下, 基于林地相应参数为 2.0 和模型公式 (2), 对 3 组数据的 w 值分别进行了优化处理 (表 2)。

采用优化后的下垫面参数值, 对 36 条流域的实际蒸散量进行了模型预测 (图 6), 并与采用 Zhang 等 (2001) 推荐下垫面参数进行预测的结果进行比较, 其一致性指标 (d_i) 和有效系数 (E_i), 对于蒸散量, 从使用原参数的 0.85 和 0.73 改进到 0.94 和 0.89, 对径流的

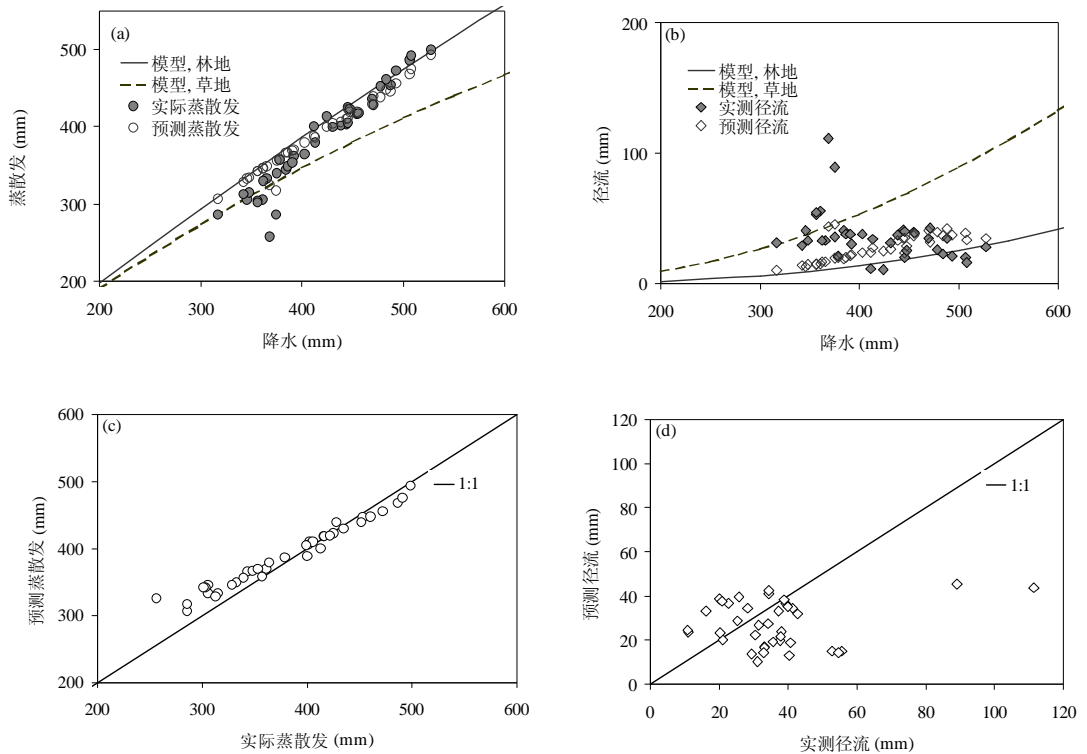


图3 黄河中游河龙区间 38 条流域实际蒸散量与 Zhang 等 (2001) 模型估算的蒸散量值 (a, c) 以及实测径流量与模型估算径流值 (b, d) 比较。

Fig. 3 Comparisons of actual and modeled ET (a, c) and streamflow (b, d) using the water balance model of Zhang et al. (2001) for 38 catchments in He-Long section of the middle Yellow River

预测精度也从原来的 0.21 和 -0.72 提高到 0.63 和 0.28，相应的，相对误差、均方误等其他统计量也均有大幅度改善 (表 3)。

3.3 区域 (流域) 多年平均水循环要素变化曲线及下垫面参数代表意义

在 Zhang 等 (2001) 建立的区域 (流域) 蒸散量估算概念模型框架下，根据黄河中游河龙区间优化后的下垫面参数，我们获取了反映河龙区间多年平均水循环要素变化曲线 (图 7)。按照下垫面参数划分代表区域 (图 8)。

从上述分析结果可知，下垫面参数适用于 1.61 的 I 组水文站代表流域，除了县川河 (旧县站) 和朱家川 (下流碛站)，主要分布在研究区南部的黄龙山—崂山和吕梁山南端林区，具有降水量较多 (平均为 500 mm)，林地面积覆盖比例大的特征。由于受林区截流蒸发作用的巨大影响，径流深偏小，平均为 22 mm，蒸发系数 (ET/P) 较高，从而适用于 1.61 的下垫面参数值。县川河旧县和朱家川下流碛两站位于研究区东北部，其地理位置及气候环境与上述 6 个水文站代表流域并不相似，但由于流域中上游地区受黄土层下石灰岩层的影响，流域漏水严重，径流深较小，不足 20 mm^[13]，特殊的岩层分布使得这两个水文站代表地区也适用于 1.61。

适用于 0.1 的 III 组 14 个水文站代表流域主要位于研究区黄河西岸的无定河流域及以北地区。该区位于毛

表 2 黄河中游河龙区间 36 个水文站分组及其 w 优化结果

Tab. 2 Grouping and parameter optimization for 36 hydrological stations in He-Long section of the middle Yellow River

组	w 优化值
I (8 个水文站)	1.61
II (14 个水文站)	0.45
III (14 个水文站)	0.10

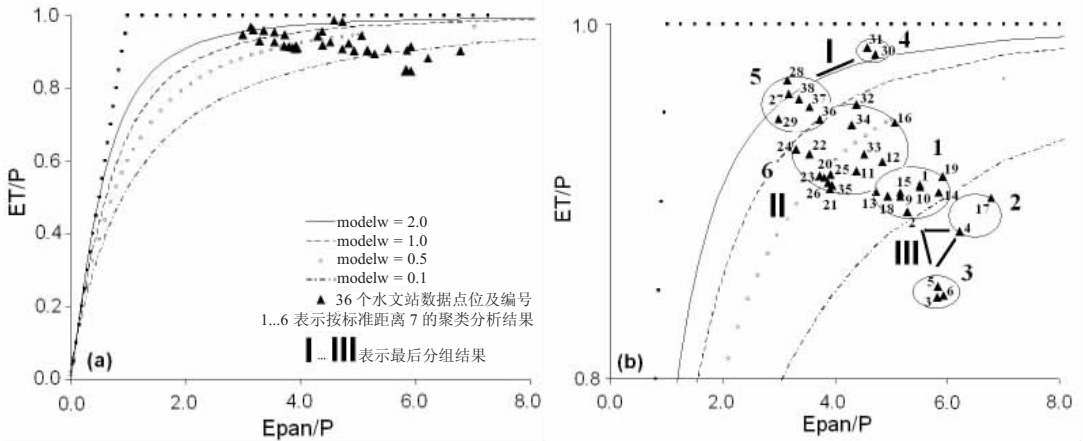


图 4 黄河中游河龙区间 36 个水文站干燥指数 ($Epan/P$) 和蒸发系数 (ET/P) 点绘图
(b) 是 (a) 的尺度放大图

Fig. 4 The scatter plot for the data recorded at the 36 hydrologic stations about the relation of (ET/P) and ($Epan/P$) in the Zhang's model (Zhang et al., 2001), in He-Long section of the middle Yellow River. (a) shows the scatter distribution in the scale of ET/P ranging from 0.0 to 1.0, and (b) is an enlarged portion of plot (a)

乌素沙地、鄂尔多斯台地边缘，粉沙覆盖层使得降雨几乎全部入渗，加上鄂尔多斯台地形成的闭流区地下径流补给影响，在秃尾河中上游形成 100 mm 以上的径流深高值区^[13, 15]。14 站平均径流深则为 40 mm。该区虽然降水量较少 (平均为 364 mm)，蒸发旺盛，但由于水循环过程受到地下径流影响，形成较低的蒸发系数，从而适用于 0.1 的下垫面参数值。

适用于 0.45 的 II 组 14 个水文站分布于南部林区和西北部风沙覆盖区之间的黄土丘陵沟壑区，区内侵蚀地貌发育典型，沟壑密度在 2.5~8 km/km²，地表裂度在 30%~70%。起伏的地形，陡峭的坡度，稀少的林地覆盖，有利于形成地表径流。因此虽然降水较南部林区偏少 (平均为 441 mm)，仍能保持较高的径流深 (平均为 34 mm)，从而蒸发系数低于南部林区，下垫面参数适用值为 0.45。

3.4 下垫面参数的推广使用

为了使优化下垫面参数能够在未控制区得以应用，我们对 36 个水文站的参数值和林地面积、干燥指数等指标进行了逐步回归分析，得到如下关系式：

$$w'_2 = 2.4136 - 1.75685(1 - f) - 0.01659(DI)^2 \quad (4)$$

式中： f 是流域林地面积比例， DI 是流域多年平均潜在蒸发量与降水量之比即流域干燥指数，其相关系数为 0.7503。

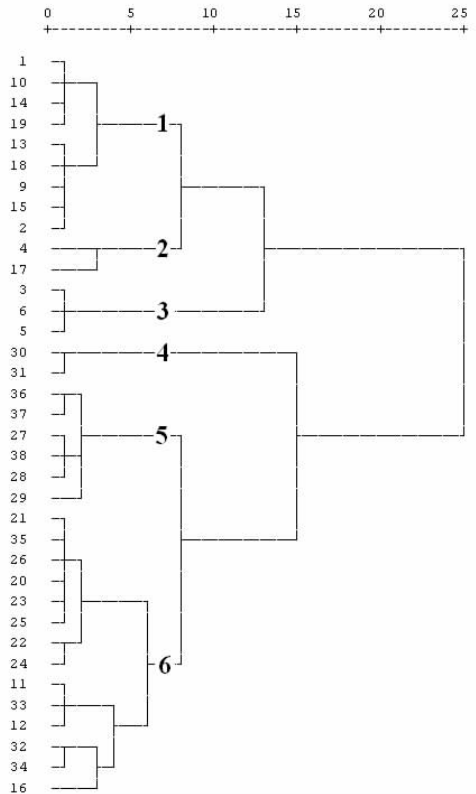


图 5 对黄河中游河龙区间 36 条流域 (水文站) 的标准化干燥指数和标准化蒸发系数聚类分析的树状图

Fig. 5 The dendrogram of the hierarchical cluster analysis for 36 nested catchments using from the standardized ratios of ET/P and $Epan/P$ in He-Long section of the middle Yellow River

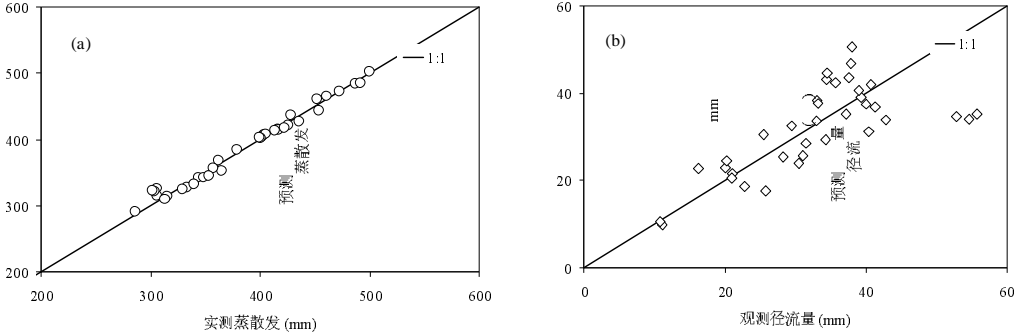


图 6 黄河中游河龙区间采用校核后参数预测结果与实际结果比较

Fig. 6 Relationships between modelled and actual average annual ET (a) and streamflow (b) for 36 catchments in He-Long section of the middle Yellow River, using optimized parameter values for w

通过公式 (4) 计算所得参数值, 可将该流域所处气候环境以及流域下垫面特征与上述 3 个不同水循环特征区域相联系, 从而将优化参数推广至全研究区。

4 结论与讨论

4.1 主要结论

本文通过验证 Zhang 等 (2001) 建立的区域 (流域) 蒸散量估算模型以及对其下垫面参数进行校核, 探索和分析了黄河中游河龙区间相应于不同的土地覆被, 其水循环要素变化规律, 对于寻求干旱地区水资源危机的适应性对策, 维系社会经济可持续发展具有重大意义。研究结果如下:

(1) 受干旱区水循环以垂直方向为主特征的影响, Zhang 等 (2001) 建立的区域 (流域) 蒸散量估算模型及其参数, 对黄河中游河龙区间实际蒸散量的预测性能好于对径流的预测性能。

表 3 黄河中游河龙区间采用优化后下垫面参数进行预测与实际值的符合程度与使用原参数预测比较

Tab. 3 Statistics for both the Zhang's model and locally calibrated model outputs compared to the observations at the 36 catchments, in He-Long section of the middle Yellow River

统计量	蒸散量 (n = 36)		径流 (n = 36)	
	原参数	优化后参数	原参数	优化后参数
一致性指标 (d_1)	0.85	0.94	0.21	0.63
有效系数 (E_1)	0.73	0.89	-0.72	0.28
最小二乘回归系数 (Slope)	1.01	1.00	0.70	0.94
偏差 (Bias, mm)	6.60	1.00	-6.6	-1.0
相对误差 (RE, %)	3.60	1.50	42.7	18.0
均方误 (RMSE, mm)	17.2	7.90	17.2	7.90

注: “n” 是水文站个数。一致性指标 (d_1 , the index of agreement) 有效系数 (E_1 , the coefficient of efficiency) 较最小二乘相关系数 (r^2) 有对异常值敏感性差的优点^[18]。这里的最小二乘回归系数 (Slope) 通过原点的回归系数。一致性指标和有效系数的计算

$$d_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n (|O_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{O}|)}, \quad d_1 \text{ 值: } 0 \sim 1;$$

$$E_1 = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, \quad E_1 \text{ 值: } -\infty \sim 1$$

式中 O_i 是观测值, P_i 是预测值, n 是观测样本数, 即 36; \bar{O} 是所有观测值均值。

(2) 获取了 Zhang 等 (2001) 模型中适宜于黄河中游河龙区间的下垫面参数。使用优化后参数使模型对河龙区间蒸散量的预测值与实际蒸散量的一致性指标从 0.89 提高到 0.94, 相对误差和均方误从 3.6% 和 17.2 mm 减小到 1.5% 和 7.9 mm。对径流, 其预测值与实际值的一致性指标从 0.21 提高到 0.63, 相对误差从 42.7% 减小到 18.0%。

(3) 河龙区间流域水循环要素变化受不同土地覆被特征影响, 分为 3 个明显不同的区域。南部林区受大面积林地截流蒸发作用影响, 使该区具有较高的蒸发系数, 下垫面参数值适用 1.61。西北部风沙覆盖区受粉沙覆盖层和闭流区地下径流补给影响, 使该区具有最小的蒸发系数, 下垫面参数值适用 0.1。中部典型黄土丘陵沟壑区介于中间, 适用参数值为 0.45。

4.2 讨论

Zhang 等 (2001) 模型对区域 (流域) 蒸散量的估计, 突出了不同植被覆盖类型的影响, 通过下垫面参数的校核, 很大程度上提高了该模型在黄河中游河龙区间对蒸散和径流的预测能力, 因此可以预测在未来的植树造林等生态环境建设后区域水资源的减少程度。由于文章采用的森林流域数据相对较少, 其优化参数在黄土高原其他地区的应用中还需采用更多数据进行验证, 以便提高模型应用精度。

值得注意的是, 由于资料问题, 文章对 Zhang 等 (2001) 区域 (流域) 蒸散量模型的验证和参数校核是基于河龙区间 1980~2000 年间径流和降雨等的实测数据进行的。黄河中游河口龙门区间受人类活

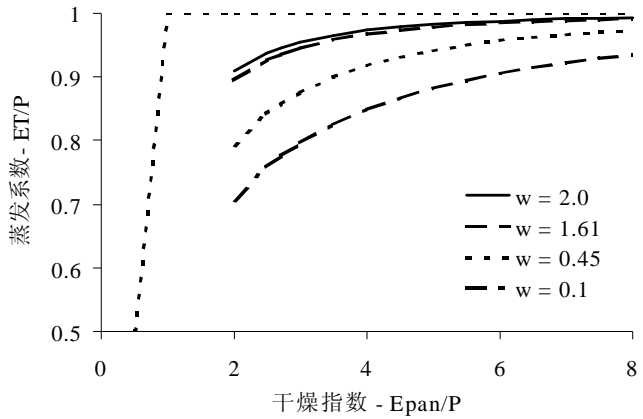


图 7 黄河中游河龙区间多年平均水循环要素变化曲线
Fig. 7 Ratio of mean annual evapotranspiration to precipitation (E/P) as a function of the index of dryness (Epan/P) for different values of parameter w in He-Long section of the middle Yellow River

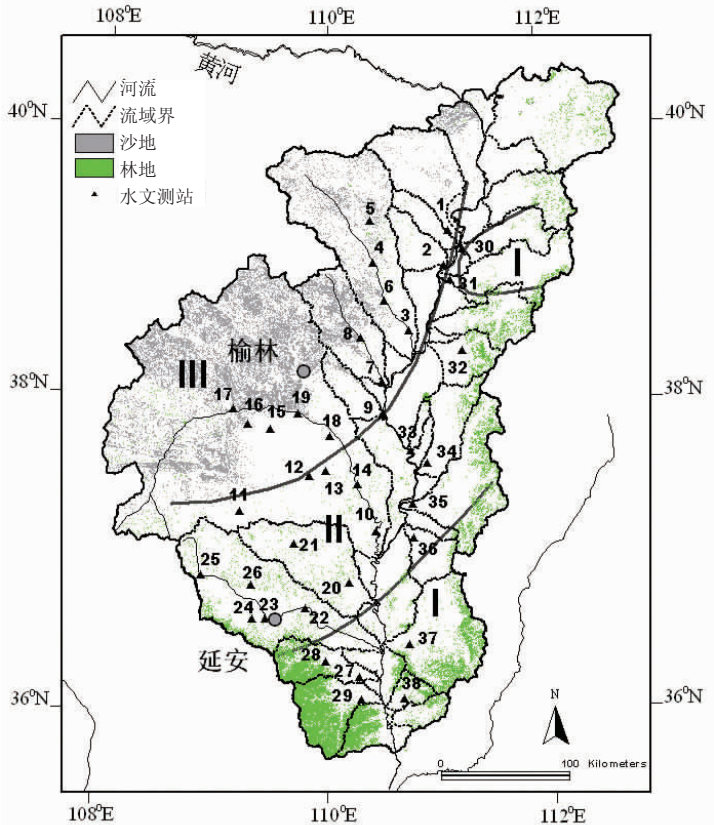


图 8 黄河中游河龙区间相应于 Zhang 等 (2001) 模型优化后下垫面参数代表区域大致划分 (同表 2、图 4)。

Fig. 8 The rough distribution of regions standing for the optimized parameter w in the water balance model (Zhang et al., 2001) from 36 hydrological stations in He-Long section of the middle Yellow River. The Roman Number is same with Tab. 2 and Fig. 4.

动影响剧烈。由于强烈的土壤侵蚀,尤其上世纪70年代以来,大面积、大规模的以调整土地利用结构、恢复植被等为主要措施的生态环境建设的开展,以及社会经济发展对水的需求,深刻地影响了水循环过程^[19],人类活动和气候变化的影响几乎同等的作用于径流量的减少^[21]。据冉大川等(2000)估计,河口镇至龙门区间1970~1996年间人类活动影响减水达21%左右,北部风沙覆盖区由于地下径流补给,南部林区由于降水量相对较高,人类活动影响减水量相对较小,而中部地区相对较高^[13],这种特殊的分布格局对多年平均水平衡规律的影响,在人类活动影响起到明显作用的20世纪70年代前后有多大,对于人口相对稠密,水资源又相对贫乏的河龙区间,值得深入研究。

致谢:参加本研究工作的还有澳大利亚联邦科工组织水土所的Tim McVicar博士, Tom Van Niel先生以及李领涛先生等,在此表示诚挚感谢。

参考文献 (References)

- [1] Budyko M I. The heat balance of the earth surface. Natl. Weather Serv., U.S. Dep. of Commer., Washington, D.C. 1958.
- [2] Schreiber P. Über die Beziehungen zwischen dem Niederschlag und der Wasserführung der Flüsse in Mitteleuropa. Z. Meteorol., 1904, (21): 441-452.
- [3] Budyko M I. Climate and Life. Academic, San Diego, Calif. 1974. 508pp.
- [4] Pike J G. The estimation of annual runoff from meteorological data in a tropical climate, Journal of Hydrology, 1964 (2): 116-123.
- [5] Milly P C D. Climate, soil water storage, and the average annual water balance. Water Resources Research, 1994 (30): 2143-2156.
- [6] Fu Baopu. On the calculation of the evaporation from land surface. Scientia Atmos Sinica, 1981, 5(1): 23-31. [傅抱璞. 论陆面蒸发的科学. 大气科学, 1981, 5(1): 23-31.]
- [7] Fu Baopu. On the calculation of evaporation from land surfaces in mountainous areas. Scientia Meteorol. Sinica, 1996, 16 (4): 328-335. [傅抱璞. 山地蒸发的计算. 气象科学, 1996, 16(4): 328-335.]
- [8] Zhang L, Dawes W R, Walker G R. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. Water Resour. Res., 2001, 37: 701-708.
- [9] Liu Changming, Ren Hongzun (eds.). Water Transformation: Experiment, Calculation and Analysis. Beijing: Science Press, 1988. [刘昌明, 任鸿遵 主编. 水量转换: 试验与计算分析. 北京: 科学出版社, 1988.]
- [10] Liu Changming, Zhong Junxiang. The effects of forest on stream flow in the Loess Plateau. Acta Geographica, Sinica, 1978, 33(2): 112-126. [刘昌明, 钟俊襄. 黄土高原森林对年径流影响的初步分析. 地理学报, 1978, 33(2): 112-126.]
- [11] Ye Qingchao (ed.). The Study of Environmental Change and Streamflow and Sediment Discharge Principle in Yellow River Basin. Jinan: Shandong Science and Technology Press, 1994. [叶青超 主编. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1994.]
- [12] Zhang Shengli et al. (eds.) The Reason of Streamflow and Sediment Discharge Change and Their Trends in the Middle Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 1998. [张胜利 等编著. 黄河中游多沙粗沙区水沙变化原因及发展趋势. 郑州: 黄河水利出版社, 1998.]
- [13] Tang Keli (ed.). The Soil Erosion in Yellow River and Its Streamflow and Sediment Discharge Change. Beijing: China Science and Technology Press, 1993. [唐克丽 主编. 黄河流域的侵蚀与径流泥沙变化. 北京: 中国科学技术出版社, 1993.]
- [14] Ran Dachuan, Liu Linwang, Zhao Liyi et al. (eds.). The Change of Soil and Water Conservation, Streamflow and Sediment in Hekou-Longmen Section of the Middle Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Conservancy Press, 2000. [冉大川, 柳林旺, 赵力仪 等编著. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化. 郑州: 黄河水利出版社, 2000.]
- [15] Eagleson P S. Ecological optimality in water-limited natural soil-vegetation systems. I. Theory and hypothesis. Water Resour. Res., 1982, 18: 325-340.
- [16] The multi-discipline science survey team on the Loess Plateau, CAS. 1991. The natural environment and its development of the Loess Plateau, the survey and study of comprehensive control and development of the Loess Plateau, 1991. 14-24. [中国科学院黄土高原综合科学考察队. 黄土高原地区自然环境及其演变, 黄土高原地区综合治理开发考察系列研究, 1991. 14-24.]
- [17] McVicar T R, Li L T, Van Niel T G et al. Spatially Distributing 21 Years of Monthly Hydrometeorological Data in

China: Spatio-Temporal Analysis of FAO-56 Crop Reference Evapotranspiration and Pan Evaporation in the Context of Climate Change. 2005.CSIRO Land and Water Technical Report 8/05, Canberra, Australia, 316 pp. <http://www.csiro.au/publications/technical2005/tr8-05.pdf>

- [18] Legates D R, Gregory J, McCabe J R. Evaluating the use of "Goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 1999, 35: 233-241.
- [19] Liu Changming, Zhang Xuecheng. Causal analysis on actual water flow reduction in the mainstream of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(3): 323-330. [刘昌明, 张学成. 黄河干流实际来水量不断减少地成因分析. *地理学报*, 2004, 59(3): 323-330.]

The Mean Annual Water Balance in Hekou-Longmen Section of the Middle Yellow River: Testing of the Catchment Scale Water Balance Model and Its Calibration

ZHANG Xiaoping^{1,2}, ZHANG Lu³, MU Xingmin^{1,2}, LI Rui^{1,2}

(1. *Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, 712100, Shaanxi, China;*

2. *Institute of Soil and Water Conservation, CAS, Yangling 712100, Shaanxi, China;*

3. *CSIRO Land and Water, Christian Laboratory, GPO Box 1666, Canberra, ACT, 2601, Australia*)

Abstract: Ecosystem health and sustainability of social and economic development in arid and semi-arid regions depends on water availability. To study the responses of water balance components to the different land cover on mean annual scale, the data of streamflow, precipitation and Epan from 1980 to 2000 in the He-Long section (briefly for Hekou-Longmen section) of the middle reaches of the Yellow River, were used to test and calibrate the water balance model set up by Zhang in 2001. The results showed that the model was able to accurately simulate average annual evapotranspiration, but not average annual streamflow when compared with streamflow measurements from 38 hydrologic stations in the study area. Using the optimized parameters, the index of agreement between modeled and observed evaporation increased from 0.89 to 0.94, and the relative error and root mean square error decreased from 3.6% and 17.2 mm to 1.5% and 7.9 mm. The index of agreement for streamflow increased from 0.21 to 0.63 and the relative error decreased from 42.7% to 18.0%. Hierarchical cluster analysis showed that 3 types of water cycles exist due to the different land cover types. The parameter optimization showed that due to the effects of forest interception, the evaporation coefficient (ET/P) in the southern part of the He-Long section is fairly high so the region is suitable for the parameter w 1.61. For the influence of sandy soil and high groundwater, the evaporation coefficient in the northwestern region is low, so that for this region the parameter value of 0.10 was used. In the middle part of the He-Long section, it is fit for the parameter value of 0.45.

Key words: parameter optimization; average annual; water cycle principle; land cover; the middle reaches of the Yellow River