

黄土丘陵沟壑区植物蒸腾和植被 蒸散估算尺度转换模型研究

于红博^{1,2}, 杨 劼¹, 宋炳煜¹

(1. 内蒙古草地生态重点实验室, 呼和浩特 010021; 2. 内蒙古师范大学 地理科学学院, 呼和浩特 010022)

摘要: 对蒸散估算的尺度放大是研究的热点问题。选择有大量数据积累的鄂尔多斯高原皇甫川流域为研究区, 利用点面结合的方式对数据进行补测, 以生物学为基础, 建立了植物蒸腾和植被蒸散模型, 经验证, 模拟效果较好。从而在植物叶片—个体—群落—景观尺度上实现了转换, 为实现好的蒸散模拟提供了方法。

关键词: 植物蒸腾; 植被蒸散; 尺度转换; 模型

中图分类号: Q945.172

文献标识码: A

文章编号: 1008-5492(2011)06-09-05

Evapotranspiration Estimated by a Scaling Model in the Ordos Plateau, China

YU Hong-bo^{1,2}, YANG Jie¹, SONG Bing-yu¹

(1. The key lab of Inner Mongolia Grassland, Huhhot 010021, China; 2. College of Geograghy Science, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China)

Abstract: Upscaling of evapotranspiration is a hot topic. The study area is located in the Huangfuchuan watershed of Ordos Plateau which had been intensively studied in the past. In order to develop models, the data were collected complementarily in an integrative way of partial and whole. Plant transpiration and vegetation evapotranspiration models were developed based on biology. The verification is at an acceptable level of uncertainty. Scaling of leaf-individual-community-landscape was realized and a good method estimating evapotranspiration was provided.

Key words: plant transpiration; vegetation evapotranspiration; scaling; model

水循环是全球气候系统中的一个主要部分, 在水循环的几个环节中, 蒸散占着特别重要的地位, 热量的释放和吸收是伴随着蒸散过程同时进行的。特别是在黄土丘陵沟壑干旱半干旱区, 蒸发量大, 平均土壤水分含量低, 水是植被生长的主要限制因子, 植被在水循环过程中扮演着重要角色。因此对植被蒸散的估算一直是众多学者研究的热点问题, 目前在不同尺度上已有蒸散估算的模型, 但是都没能以生物因子为主线将不同尺度的模型串起来, 特别在将小尺度上获得的蒸腾或蒸散量应用到较大尺度上时, 存在简单地线性放大或外延问题, 因此蒸散量的尺度扩大是一个急需解决的问题。

本研究选择有大量数据积累的鄂尔多斯高原皇甫川流域为研究区, 在前人的工作基础上, 以生物学为基础, 建立了植物蒸腾和植被蒸散模型, 在植物叶片一个

体—群落—景观尺度上实现了转换。这不仅是一个实例研究, 而且为蒸散模拟提供好的方法, 对于提高植被水分利用率也有指导意义, 具有重要的应用前景。

1 研究区概况与试验方法

1.1 研究区自然概况

皇甫川流域是黄河中游的一级支流, 发源于鄂尔多斯高原与黄土高原的过渡地带, 是半干旱区一条典型的季节性河流, 在陕西省境内入黄河, 介于 9.2° — 9.9° N, 111.0° — 111.2° E, 全长 12 km, 面积约为 24 km^2 , 位于鄂尔多斯高原的东部, 属于温带干旱半干旱典型草原区。

皇甫川流域较大的地势高差和较强的暴雨侵蚀使流域水系充分发育, 加上现代加速的人为水土流

收稿日期: 2011-06-04

资助项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB11687); 国家自然科学基金项目(4066104); 内蒙古自然科学基金项目(200802055)。

作者简介: 于红博(1977-), 女(满族), 内蒙古呼和浩特市人, 讲师, 博士, 主要从事生态建模与遥感图像处理方面的研究。E-mail: y_b_fan6@yahoo.com.cn

通信作者: 杨劼(1965-), 女(蒙古族), 内蒙古呼和浩特市人, 博士, 教授, 从事植物生理和草地生态学研究。E-mail: Jyang@imu.edu.cn

失, 将流域切割塑造成梁峁窄小, 沟壑密布, 地形破碎的丘陵沟壑地貌, 属于强烈水土流失区, 是水土保持综合治理的主要区域。气温自西北向东南递增, 年平均气温 6.2~7.2℃, ≥1℃积温 2900~5000℃。该流域光能资源丰富, 日照充足, 大部分地区年日照时数在 2000 h 以上。历年平均降雨量 420~790 mm, 并集中在夏季, 6~8 月的降雨量占总降水量的 61%。年平均蒸发量很大, 为年平均降水量的 2.7 倍左右。年平均相对湿度 50%~56%。冬春季风力强盛且频繁, 平均风速 2~3 m/s, 大风日数 10~15 d。地带性土壤为以砂岩为母质的栗钙土^[1]。

天然植被以小半灌木和草本植物居多, 建群种有百里香(*Thymus serpyllum*)、本氏针茅(*Stipa bungeana*)等。人工植被以人工油松(*Pinus tabulaeformis*)、小叶杨(*Populus simonii*)、沙柳(*Salix psammophylla*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、中间锦鸡儿(*Caragana intermedia*) 为主。农作物以玉米(*Zea mays*)和糜子(*Panicum miliaceum*) 等为主。

1.2 试验方法

本研究主要数据来源为本项目组对皇甫川流域从 2011~2017 年研究的大量数据积累, 同时基于建模的需求, 主要采用原来的方法对下列数据进行了补测。

1.2.1 群落特征调查 草本样方调查面积为 1 m × 1 m, 对群落总盖度和植物种类组成以及每一物种的高度、密度、投影盖度、生物量(鲜重和干重)进行调查和记录。灌木样方调查面积为 1 m × 1 m, 测定每一植株的冠幅和株高, 并选取样株用刈割法烘干称重, 记录全树总叶干重。

1.2.2 叶面积与叶干重的测定 对采集的每个叶片用坐标纸计算叶面积, 然后将叶片在 60℃的烘箱中烘干, 称重, 建立叶面积和叶干重的回归关系。对灌丛确定标准株, 采用整树刈割法, 烘干称重, 由全株叶干重推算全株总叶面积。群落叶干重由标准株叶干重和标准株的数量推得。

1.2.3 蒸腾测定 采用两种方法: 用快速离体称重法测定草本蒸腾强度; 用 LI-6400 便携式光合系统测定草本和灌木叶片蒸腾速率; 用热耗散法(TDP)测定单株灌木的液流量。

1.2.4 群落蒸散量的测定 草本群落采用土柱称重法。称重时间为观测日的 5:00-19:00, 每隔 1 h 或 2 h 称重一次。根据土柱重量变化获得每小时土柱蒸散的平均值, 以此计算出草本样地的蒸散量。每天重做一次土柱样品。

灌木林的蒸散量= 灌木的蒸腾量+ 裸间蒸散量。

1.2.5 气象数据 由自动气象站观测和气象部门提供。

1.2.6 遥感数据和空间数据 遥感影像资料为 2011 年 9 月 2 日皇甫川流域的 Landsat-5 TM 卫星数据; 皇甫川流域 1:50000 数字地形图; 共享的 2011 年皇甫川流域植被分布图。

1.2.7 数据处理 用 SPSS 17.0、Excel 2003 和 Visual C++ 对所测定数据进行处理和分析; 用 PCI 8.2、Erdas 8.4 和 ArcGIS 9.2 软件对遥感影像进行处理、分析和制图。

2 方法体系和结果分析

本研究的方法体系如图 1 所示。研究内容主要分为三部分, 各部分模型的建立都是在前一层次模型的基础上运用环境和生物因子完成的, 其中植物个体尺度模型建立在植物叶片尺度基础之上。

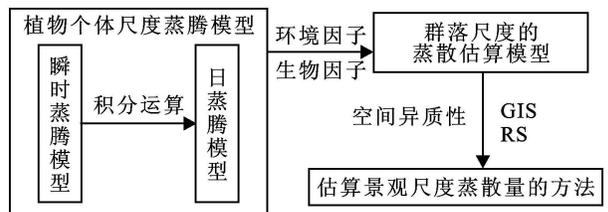


图 1 方法体系

2.1 植物个体尺度的蒸腾模型

外界环境对蒸腾的影响主要表现在提供叶内水分由液态变为气态的能量, 以及叶片和周围环境之间的水汽压梯度与边界层阻力的变化方面^[2]。太阳辐射决定着水分在蒸发过程中的能量供给; 空气温度、大气相对湿度、气压、风速影响着蒸发的水汽向大气中进行扩散的过程。

2.1.1 草本植物 草本植物的瞬时蒸腾模型考虑了太阳总辐射、空气温度和风速对蒸腾的影响, 植物特性因子考虑了叶气孔导度和单株干重这两个参数, 参考 Penman 模型和 Priestley-Taylor 等模型中空气热力学因素对蒸腾的作用^[1], 建立模型如式(1)。

$$ET_{ch,i} = \max \left[a \times \frac{(\Delta \cdot Q + \gamma \cdot g) \cdot W}{5 \cdot (\Delta + \gamma \cdot u_2)} + b, \right] \quad (1)$$

式中: $ET_{ch,i}$ ——单株草本瞬时蒸腾量 [$g/(h \cdot 株)$]; Δ ——饱和水汽压斜率 (kPa/K); Q ——太阳总辐射 (W/m^2); γ ——潜在蒸散常数 (kPa/K); g ——叶气孔导度 [$mol/(m^2 \cdot s)$]; W ——单株草本干重 ($g/株$); u_2 ——2 m 高度处风速 (m/s); a, b ——调整因子, 取 $a=1.1486, b=0.974$ 。

饱和水汽压斜率的计算公式如式(2)。

$$\Delta = 21.25 \times e_s \times \left[\frac{4.97.7}{(T_d + 27.3)^2 (T_d + 27)} - \frac{1}{(T_d + 27)^2} \right] \quad (2)$$

潜在蒸散常数的计算公式如式()。

$$\gamma = \frac{2.9}{595 - 0.51T_d} \quad ()$$

$$e_s = 0.6178 \times \exp\left(\frac{17.268 \times T_d}{273 + T_d}\right) \quad (4)$$

式中: T_d ——空气温度(°C); e_s ——饱和水汽压(kPa):

模型评价指标值如表 1 所示。从结果来看, 决定系数和修正决定系数均在 0.6 以上, 拟合度为 0.879 2, 绝对误差指标都较小, 模型的无偏性显著, 拟合程度较好。模拟结果如图 2 所示。

表 1 模型评价指标值

模型评价指标	R^2	R_a^2	MAE	RMSE	Outlier	d
模型评价指标值	0.67	0.61	0.5842	0.745	0.1611	0.8792

注: R^2 : 决定系数; R_a^2 : 修正决定系数; MAE: 平均绝对误差; RMSE: 平均误差平方的平方根; Outlier: RMSE 与 MAE 的差异程度; d: 拟合度, 下同。

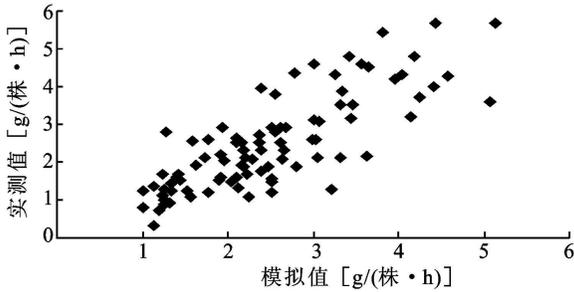


图 2 单株草本瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比

无论草本蒸腾量日变化是单峰曲线还是双峰曲线, 都可将各段曲线看作是某一正弦函数曲线的一部分, 通过在各异的区间进行积分运算, 然后取和, 可将草本植物的瞬时蒸腾量转换为日蒸腾量。依据该方法得到的模拟结果如图 3 所示, 平均相对误差为 16.87%, 在误差允许范围之内, 该模型可用来模拟草本植物的日蒸腾量。

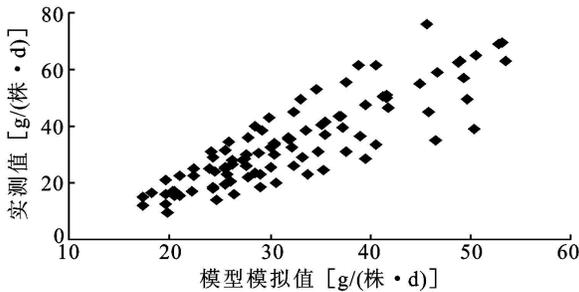


图 3 草本日蒸腾量模型模拟值与实测值对比

2.1.2 灌木植物 灌木蒸腾模型中考虑了水汽压差对蒸腾的作用, 其瞬时蒸腾模型如式(5)。

$$ET_{gm,i} = \max\left[a \times \frac{(\Delta \cdot Q + VPD \cdot g) \cdot W}{5 \times (\Delta + \gamma)} + b, 0\right] \quad (5)$$

式中: $ET_{gm,i}$ ——灌木的瞬时蒸腾量[$g/(h \cdot 株)$];

VPD ——水汽压差(kPa); W ——单木叶干重($g/株$); a, b ——调整因子, 取 $a = 1.628, b = 17.49$; 其它变量说明如前。

水汽压差的计算公式^[4]如式(6)。

$$VPD = e_s - e_d = e_s(1 - RH) = 0.6178 \times \exp\left(\frac{17.268 \times T_d}{273 + T_d}\right) \times (1 - RH) \quad (6)$$

式中: e_d ——实际水汽压(kPa); RH ——空气相对湿度; 其它变量说明同前。

采用研究区主要灌木树种对模型进行验证, 结果如图 4、图 5 所示。中国沙棘的瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比, 平均相对误差为 1.6%; 中间锦鸡儿的瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比, 平均相对误差为 15.9%, 在误差允许范围之内。

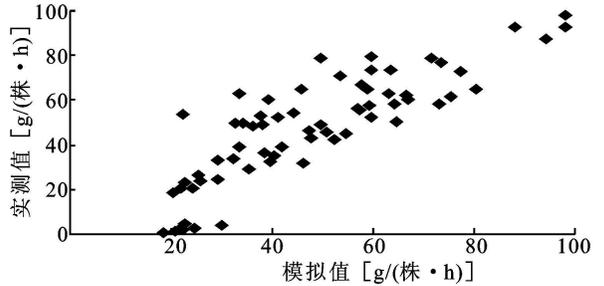


图 4 中国沙棘的瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比

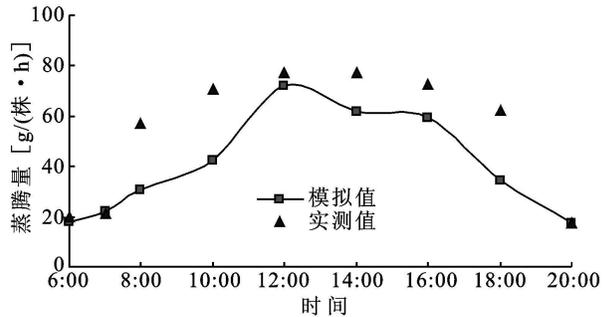


图 5 中间锦鸡儿的瞬时蒸腾量模拟值与实测值对比

通过积分运算, 实现将灌木的瞬时蒸腾量转换为日蒸腾量, 结果如图 6、图 7 所示。模拟值与实测值之间比较吻合, 经统计, 中国沙棘平均相对误差为 11.62%, 中间锦鸡儿平均相对误差为 17.4%, 在误差允许范围之内。

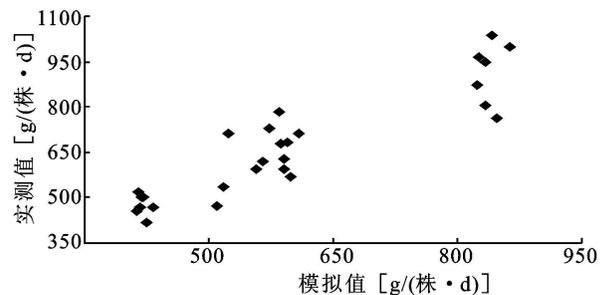


图 6 中国沙棘日蒸腾量模拟值与实测值对比

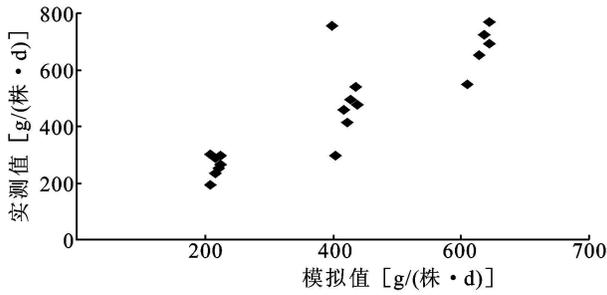


图 7 中间锦鸡儿日蒸腾量模拟值与实测值对比

$$ET = \frac{Q \cdot VPD \cdot \left\{ \exp \left[.8 + \sum_{i=1}^{i=n} (SCD_{gm,i} \cdot LAI_{gm,i} \cdot \frac{ET_{gm,i}}{W_{gm,i}}) \right] + \exp \left(.8 + SCD_{cb} \cdot LAI_{cb} \cdot \frac{ET_{cb}}{W_{cb}} \right) \right\}}{L \cdot \Delta} + .9 \quad (7)$$

式中: ET ——群落蒸散量 (mm/h); $SCD_{gm,i}$ ——灌木群落中优势种或亚优势种的群落盖度; $LAI_{gm,i}$ ——灌木群落中优势种或亚优势种的群落叶面积指数; $ET_{gm,i}$ ——灌木群落中优势种或亚优势种的瞬时单株蒸腾量 ($g/株 \cdot h$); $W_{gm,i}$ ——取值为 $ET_{gm,i}$ 的单株叶干重 ($g/株$); SCD_{cb} ——灌木群落中棵间草本的群落盖度; LAI_{cb} ——灌木群落中棵间草本的群落叶面积指数; ET_{cb} ——灌木群落中棵间草本的瞬时单株蒸腾量 ($g/株 \cdot h$); W_{cb} ——取值为 ET_{cb} 的单株干重 ($g/株$); L ——水的汽化潜热 (J/kg), 取 $2.49 \times 10^6 J/kg$ 。

当用式(7)估算草本群落蒸散时, 取 $\sum_{i=1}^{i=n} (SCD_{gm,i} \cdot LAI_{gm,i} \cdot \frac{ET_{gm,i}}{W_{gm,i}}) =$ 。群落叶面积指数 LAI 为群落叶面积 LA 与样方面积之比, 而群落叶面积 LA 由它和群落叶干重的回归关系得到: $LA = f(W)$ 。

图 8 和图 9 分别为草本群落和灌木群落蒸散的模拟结果。对群落蒸散精度进行分析, 评价指标如表 2 所示。决定系数和修正决定系数均在 .7 以上, 拟合度在 .88 以上, 绝对误差指标都较小, 模型的无偏性显著, 拟合程度较好。

表 2 群落蒸散模型评价指标值

群落类型	R^2	R^2_a	MAE	RMSE	Outlier	d
草本群落	.791	.769	.678	.828	.15	.8845
灌木群落	.8188	.8165	.489	.617	.128	.928

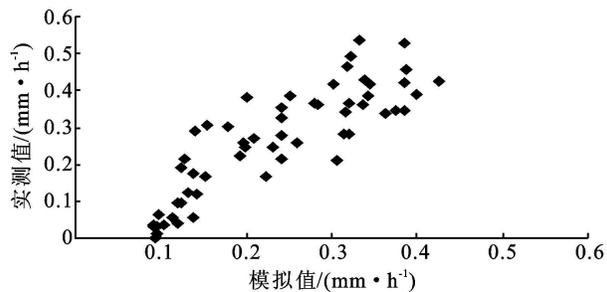


图 8 草本群落蒸散量模拟值与实测值对比

2.2 群落尺度的蒸散估算模型

综合考虑群落中不同生活型植物的盖度、叶面积指数和个体蒸腾量对群落蒸散的影响, 使模型在复杂下垫面的应用不会受到太大限制, 并使模型包含尽量少的参数, 增强其应用性。在植物个体尺度蒸腾模型基础上, 根据群落蒸散量与主要环境因子太阳总辐射和空气温度的关系, 建立了群落蒸散模型, 该模型既可估算草本群落的蒸散量, 也可对灌木群落的蒸散量进行估算。

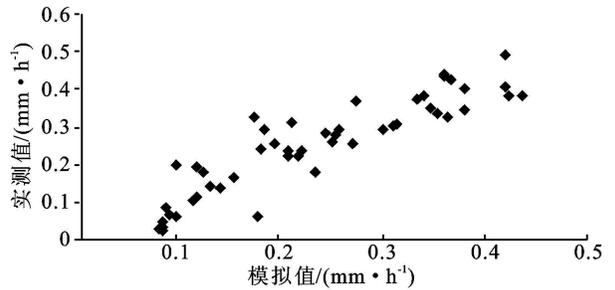


图 9 灌木群落蒸散量模拟值与实测值对比

2. 景观尺度蒸散估算方法

景观尺度蒸散过程与群落尺度蒸散过程可认为其机理没有发生变化, 对蒸散量估算的最大不同在于体现景观异质性。本研究以 GIS 为平台, 用 1:5 等高线图 (包括皇甫川流域的大部分区域, 大约有 4% 的面积没有被囊括进来) 建立了该流域的数字高程模型, 进而得到该流域的坡向和坡度图, 考虑了它们对太阳辐射产生的影响; 用 2002 年 9 月 2 日的 TM 影像获得了植被盖度图; 以及由本项目组成员人工解译绘制的 2002 年该流域的植被分布图^[5], 用这些参量来体现景观异质性。考虑体现空间异质性的上述参量, 运用已有的 2002 年 8 月份实测数据, 通过 GIS 软件在每个栅格上运行群落蒸散模型, 可得到流域蒸散量, 结果如附图 5 所示。该流域日蒸散量分布与地表状况比较吻合, 裸河床、裸砂岩、沙地以及城区的日蒸散量较小, 植被密集的地方 (河床两侧的农田) 蒸散值最大, 明显高于植被稀疏的地区, 由于该区沟壑密布, 阳坡的蒸散量明显高于阴坡。

运用本项目组进行群落调查、实验研究以及数据分析处理得到的 2002 年主要群落蒸散实测值对该方法进行验证, 实测值为对该流域典型样地的测量结果。结果如表 3 所示。平均相对误差为 14.95%, 在误差允许范围之内。

表 流域蒸散模拟值与实测值对比

群落类型	模型估算值/ (mm · d ⁻¹)	实测值/ (mm · d ⁻¹)	相对误差/%
杨树林	2.9 85	.6 25	19.9
油松林	2.8167	2.4281	16.
中间锦鸡儿灌丛	2.9 6	2.72	6.85
沙棘灌丛	. 598	2.78	1 . 6
本氏针茅群落	2.8 1	2. 2	2 .69
坝耕地	4. 465	5.185	16.17

结语

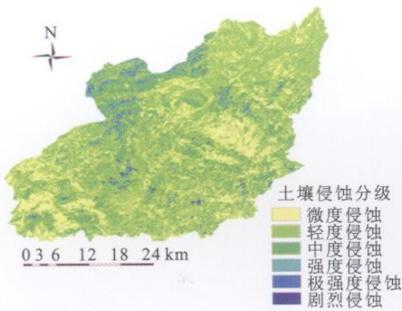
本文通过上述研究,在本项目组多年数据积累的基础上,初步实现了基于生物因子的植物蒸腾、植被蒸散估算模型,在植物叶片-个体-群落-景观尺度间实现了转换,为蒸散尺度转换研究奠定了一定的基础,也可以为其他科研工作者提供参考和借鉴,使蒸散估算尺度转换模型更科学更客观。

(上接第 89 页)

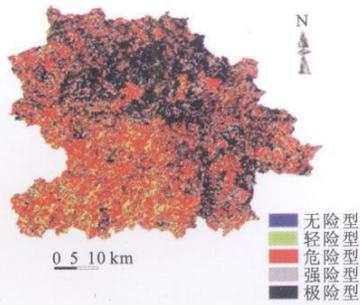
- [4] Abd El-Ghani M M, Amer W M. Soil vegetation relationships in a coastal desert plain of southern Sinai Egypt [J]. *Journal of Arid Environments*, 2005, 55: 67-628.
- [5] Silvestri S, Defina A, Marani M. Tidal regime, salinity and salt marsh plant zonation Estuarine [J]. *Coastal and Shelf Science*, 2005, 62: 119-124.
- [6] 刘庆. 青海湖北岸环境梯度上植物群落的生物量与物种多样性及其相互关系[J]. *西北植物学报*, 2002, 2(2): 259-267.
- [7] 王顺忠, 陈桂琛, 柏玉平, 等. 青海湖鸟岛地区植物群落物种多样性与土壤环境因子的关系[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1): 186-188.
- [8] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 黄河河口盐沼植被分布、多样性与土壤化学因子的相关关系[J]. *生态学报*, 2009, 29(2): 676-687.
- [9] 贺强, 崔保山, 赵欣胜, 等. 水盐梯度下黄河三角洲湿地植被空间分异规律的定量分析[J]. *湿地科学*, 2007, 5(): 208-214.
- [10] Funk D W, Noel L E, Freedman A H. Environmental gradients plant distribution and species richness in arctic saltmarsh near Prudhoe bay [J]. *Alaska Wetlands Ecology and Management*, 2004, 12: 215-224.
- [11] 邱扬, 张金屯. 基于 DCCA 的排序轴分类及其在植被群落生态梯度分析中的应用[J]. *生态学报*, 2002, 2(5):

参考文献:

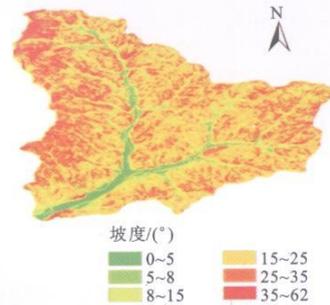
- [1] 杨劫, 高清竹, 李国强, 等. 皇甫川流域几种主要植物水分生态特征[J]. *生态学报*, 2004, 24(11): 287-294.
- [2] 程根伟, 余新晓, 赵玉涛, 等. 山地森林生态系统水文循环与数学模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [3] Angel Unset, Imma Farre, Antonio Martinez-Cob, et al. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions [J]. *Agricultural Water Management*, 2004, 66: 205-219.
- [4] 许红梅. 黄土高原丘陵沟壑区小流域植被净第一性生产过程模拟研究[D]. 北京: 北京师范大学, 2002.
- [5] 包铁军. 皇甫川流域植被生态用水分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2005.
- [6] 1992-6.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978: 9-129.
- [13] 张远东. 荒漠绿洲过渡带植被与绿洲稳定性研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2002: 2-48.
- [14] 马明东, 罗承德, 张键, 等. 云杉天然林分生境条件数量分类与环境解释[J]. *中国生态农业学报*, 2006(4): 159-164.
- [15] 刘秋锋, 康慕谊, 刘全儒. 中条山混沟地区森林乔木种的数量分类与环境解释[J]. *植物生态学报*, 2006, (): 8-91.
- [16] 刘秋锋, 康慕谊, 刘全儒. 混沟森林植被物种多样性梯度分析与环境解释[J]. *西北植物学报*, 2006, 26(8): 1686-1692.
- [17] 张先平, 王孟本, 余波, 等. 庞泉沟自然保护区森林群落的数量分类与排序[J]. *生态学报*, 2006(): 755-761.
- [18] 中国国植被编辑委员会. 中国植被[M]. 北京: 科学出版社, 1980.
- [19] 周晓红, 李宪伟, 白限丽. 我国植被数量分析方法的研究概况和发展趋势[J]. *生态学杂志*, 2005, 25(4): 448-451.
- [20] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 178-209.



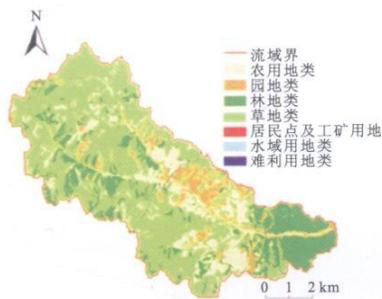
附图1 土壤侵蚀分级



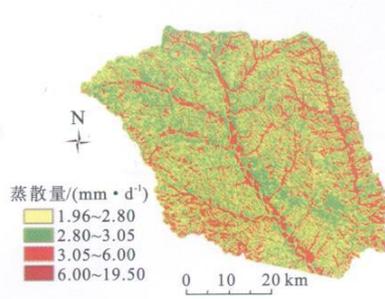
附图2 安溪县土壤侵蚀潜在危险度分布图



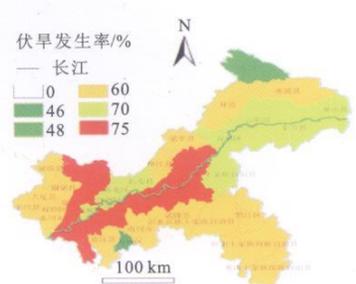
附图3 小流域坡度图



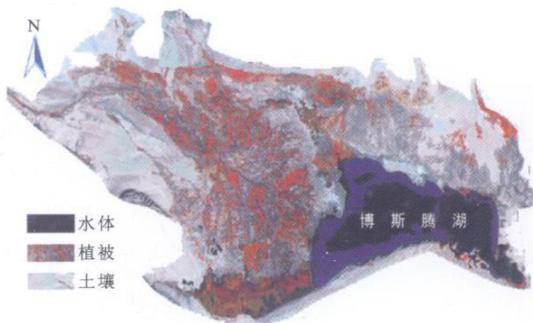
附图4 马家沟流域2008年土地利用及上中下游划分



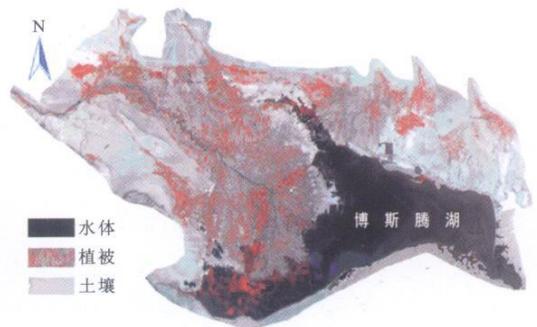
附图5 2003年9月2日皇甫川流域日蒸散量估算值



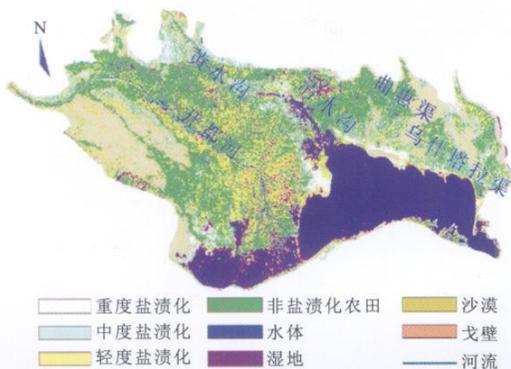
附图6 重庆市高温伏旱频率分布图



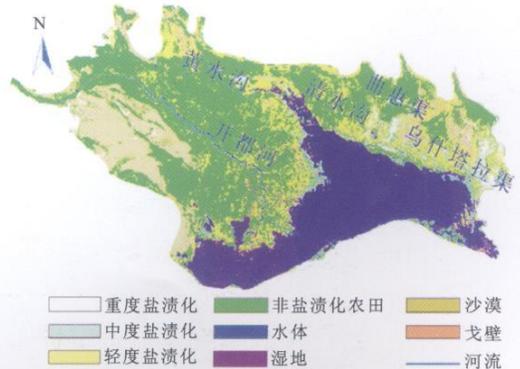
附图7 1990年TM影像假彩色合成图



附图8 2008年CBERS影像假彩色合成图



附图9 1990年TM合成影像分类图



附图10 2008年CBERS合成影像分类图