

2000—2014年三峡库区重庆段地表蒸散量时空分布规律^{*}

刘睿, 彭瑶, 肖林林

(重庆师范大学 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要:【目的】研究2000—2014年三峡库区重庆段地表蒸散量(Evapotranspiration, ET)的时空分布规律。【方法】基于MOD16-ET产品,在GIS技术支持下,采用趋势分析、样带分析等方法定量分析ET时空分布特征(多年平均以及月尺度)及该特征与土地利用/覆被、地形的空间耦合规律。【结果】2000—2014年研究区域多年平均ET为749.0 mm;呈现西低东高的基本特征,ET剖面线上出现“长寿—涪陵”陡增点。ET年际变化整体表现为先增后减态势,其中ET存在统计学意义上减少($p < 0.05$)的区域面积占库区总面积的14.5%,而ET存在统计学意义上增加($p < 0.05$)的区域面积占库区总面积的4.34%。ET年内变化特征与该区域水热季节性变化规律基本一致,在月尺度上ET存在先增后减的单峰变化趋势(最大ET出现在7月,为117.4 mm)。地表覆盖类型按ET值大小由高到低排序依次为:灌木林地、乔木林地、草地、耕地、其他稀疏植被。地表覆盖类型与海拔及坡度在空间分布上与ET存在高度空间耦合。【结论】三峡库区重庆段ET时空分布规律明显,受地表覆盖类型及地形影响较强,研究结果可为分析三峡库区旱涝灾害成因,构建合理生态需水配置模式提供重要参考。

关键词:三峡库区重庆段;地表蒸散量;时空分布;土地覆被/土地利用;地形

中图分类号:P426.2;K903

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2018)03-0075-07

地表蒸散量(Evapotranspiration, ET)是陆地生态系统向大气输送的水汽总通量,包括从地表和植物表面的水分蒸发以及植物的水分蒸腾,调节着地表的水量平衡与热量平衡^[1],进而在很大程度上决定着地理环境的形成与演化^[2]。认识与揭示复杂地表背景下ET的时空演变规律,对于区域水资源管理与调控、干旱灾害监测以及气候变化与生态系统水汽交换相互作用规律的研究等具有重要的参考价值与科学意义^[3-6]。

目前,对ET的研究主要基于3种数据:1) 站点实测数据:该数据相对可靠,但成本较高且样本数量有限,一般用于验证其他方法^[7-8]。2) 机理模型模拟:以Penman-Monteith(PM)模型和Shuttleworth-Wallace(SW)模型最为常见,能明确ET的变化及影响机制^[9],但涉及参数较多且不易获取,模拟结果仍以点数据为主,不能实现区域覆盖。3) 遥感反演产品:多源遥感数据反演已经成为得到高精度、全覆盖ET数据不可替代的手段^[10-12]。美国航空航天局(NASA)于2011年开发出MOD16-ET产品^[13-14]。该产品集成了MODIS遥感数据多波段、高时间分辨率的优势,已在国内外得到广泛使用,并极大地推动了ET的相关研究^[15]。

三峡库区位于长江上游的末端,是关系到长江流域生态安全的全国性生态屏障地区。然而,该地区最近10余年来极端旱涝灾害时有发生,如1998年特大洪涝、2006年特大干旱等;且旱涝灾害发生的强度与频率均表现出加剧的趋势^[16]。在三峡库区特有生态环境下,多样地形环境和下垫面所产生的复杂ET,强烈地影响着该区水汽交换与局部气候变化。因此,研究三峡库区ET特征已成为该区旱涝灾害预测及水资源合理利用的迫切需求。目前,国内外对三峡库区ET的研究开展较少,王贤等人^[17]应用CoupModel结合野外观测试验,分析了三峡库区典型农林地的水量平衡;熊友胜等人^[18]基于PM模型计算了重庆市北碚区2001—2011年的点状ET;何毅等人^[19]则用PM模型估算了三峡库区12个气象站点的ET。可见,现有研究仅仅在“点”尺度上开展,尚未实现“区域覆盖”,且缺乏对三峡库区ET时空变化及相关规律的总体认识。

^{*} 收稿日期:2017-04-07 修回日期:2018-04-18 网络出版时间:2018-05-22 10:01

资助项目:重庆市基础与前沿研究计划(No. CSTC2014JCYJA90012);重庆市教育委员会科技项目(No. KJ1703045);重庆市社会民生科技创新专项(No. CSTC2015SHSZX20014);教育部人文社会科学研究项目(No. 16YJCZH061)

第一作者简介:刘睿,男,副教授,博士,研究方向为资源环境遥感,E-mail: Liur@cqnu.edu.cn;通信作者:肖林林,男,副教授,博士,E-mail: xiaoll@cqnu.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20180522.1001.012.html>

基于上述背景,本研究以三峡库区重庆段为研究区域,在可行性分析基础之上运用 MOD16-ET 产品,结合土地利用/覆被数据以及地形数据,分析三峡库区重庆段 2000—2014 年 ET 时空变化特征及 ET 与地表覆盖、地形因子空间的耦合规律。研究结果有望为分析近些年来三峡库区发生极端旱涝灾害的成因及揭示其中的水量平衡关系、深化库区 ET 过程研究以及构建三峡库区合理生态需水配置模式提供科学依据及数据参考。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

研究区地理范围位于北纬 $28^{\circ}31' \sim 31^{\circ}44'$ 、东经 $105^{\circ}49' \sim 110^{\circ}12'$ 之间(封二彩图 1),位于长江上游末端,地处四川盆地与长江中下游平原的结合部;涵盖重庆市所辖 22 个区、县(自治县),面积达 $46\,158.53\text{ km}^2$,占整个三峡库区总面积的 85% 以上。研究区域地跨大巴山断褶带、川东褶皱带和川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元,地貌以山地、丘陵为主,地形环境复杂。区域内植被类型丰富,地带性植被以亚热带常绿阔叶林、暖性针叶林为主;区域内森林覆盖率为 22.3%^[20]。该区域气候类型为亚热带季风性湿润气候,多年平均气温为 $15 \sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$;年平均降雨量为 $1\,150.26\text{ mm}$,主要降雨集中在夏季,并存在雨热同期的特点^[21-22]。由于不同年份西太平洋副热带高压等大气环流系统的活动有较大差异,导致区域内的夏季降水变率较大,洪涝灾害频发^[16]。

1.2 数据来源与处理

1.2.1 MOD16-ET 产品及可行性分析 MOD16-ET 产品数据集来源于 NASA 的 EOS 系统(<https://ladsweb.nascom.nasa.gov>),包括全球植被覆盖区域的 8 天、月、年尺度的 ET、潜热通量(LE)、潜在蒸散量(PET)和潜在潜热通量(PLE);空间分辨率分为 1 km 和 0.05° 。本研究选用其中的 ET 产品,且选用的时间分辨率为月和年两种,时间范围为 2000—2014 年,空间分辨率为 1 km 。MOD16-ET 算法基于 Penman-Monteith 公式,考虑了土壤表面蒸发、冠层截留水分蒸发和植物蒸腾^[23]。MOD16-ET 产品是基于 SIN 投影的 HDF 格式,利用 MRT 工具将之转换为双标准纬线圆锥投影及 GeoTiff 格式,然后以研究区矢量面文件为掩膜进行裁剪。采用流域水量平衡法即假定“流域年降水量=流域年蒸散量+年径流量”对 MOD16-ET 产品数据进行了可行性分析。从年径流量数据的可获取性及流域空间位置综合考虑,决定采用与三峡库区重庆段存在空间交叉的嘉陵江流域北碚水文站点的年径流量数据。首先将水文站点位置、地形图以及嘉陵江流域范围空间叠置,勾出水文站点实际控制流域范围;然后采用区域统计方法,得到 2000—2014 年间逐年水文站点控制流域范围内的年平均降雨量作为实际降水,而降水空间数据由库区重庆段内部与周边地区气象站点降雨数据 Kriging 插值得到,并同时获得该区域同期的 ET;最后将采用水量平衡公式估算的降水与实际降水对比,评估 MOD16-ET 产品精确度。图 2 显示,降水实测值与利用 MOD16-ET 产品和径流量计算得到的降水估算值比较吻合;双尾 t 检验结果显示,两者并无统计学意义上的差异,相关性分析也显示两者呈统计学意义上的正相关关系($R^2 = 0.81, p < 0.05$),可见未经校正的 MOD16-ET 产品在研究区的精度总体上符合要求,可用于研究区域的 ET 时空变化研究。

1.2.2 土地利用/土地覆被及地形数据 土地利用/覆被数据来源于环境保护部和中国科学院联合开展的“全国生态环境十年变化(2000—2010 年)遥感调查与评估”项目,空间分辨率为 30 m ,共分为 6 个 I 级类,38 个 II 级类。本研究主要探讨乔木林地、灌木林地、草地、耕地和其他稀疏植被共 5 种地类的蒸散特征(未统计其他人工表面与水体)。地形数据来源于 NASA 生产的全球数字高程模型 GDEM 的 V2 版本,空间分辨率为 30 m 。基于该数据得到区域高程、坡度等地形因子信息。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析法 采用一元线性回归方程

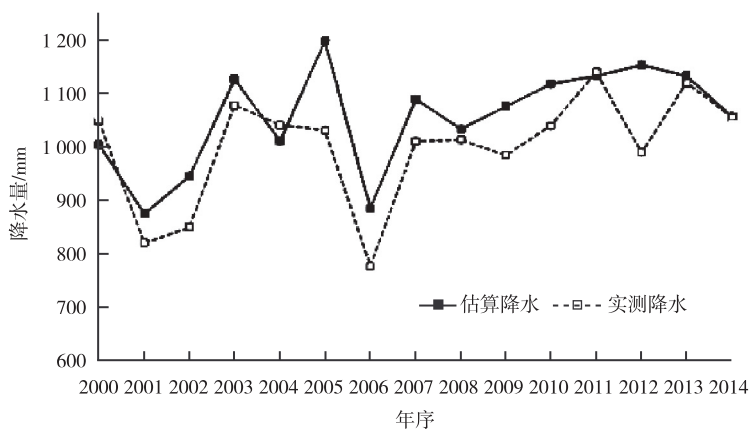


图 2 嘉陵江流域年均降水实测值和估算值比较

Fig. 2 Comparison of measured and estimated precipitation values in Jialing river basin

的斜率(S)来分析2000—2014年每个栅格单元上蒸散量的年际变化趋势。计算公式为:

$$S = \frac{n \times \sum_{j=1}^n (j \times V_{ET}^j) - \sum_{j=1}^n j \sum_{j=1}^n V_{ET}^j}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - \left(\sum_{j=1}^n j \right)^2}。$$

式中, j 为2000—2014年的年序号($j=1,2,\dots,15$), V_{ET}^j 为第 j 年的ET。运用GIS软件中的栅格计算功能,计算三峡库区重庆段ET在2000—2014年期间的变化趋势图(具体到栅格单元)。趋势图像元点的值代表15年的ET的总体变化趋势。 $S>0$ 则说明ET是增加的, $S<0$ 说明ET是减少的。结合回归方程的相关系数就可以判断出给定像元ET增减趋势及增减程度是否具有统计学意义(当 $p<0.05$ 时,有关统计结果具有统计学意义)。

1.3.2 样带分析法 鉴于一般样带分析法在空间上存在难以团聚的缺陷以及三峡库区重庆段顺长江走势呈狭长袋状特征,本研究设计了一种嵌套式的样带分析法,旨在表征三峡库区重庆段ET空间分布的整体格局。具体方法为:首先对研究区长江水系(矢量)进行一定的平滑处理,并分段(每7.5 km分成1段,共分成84段)作为一级样带;其次过每个断面生成二级样带,二级样带两端延长至研究区边界为止;然后统计每个二级样带经历过的像元ET的平均值作为一级样带上的节点值;最后以长江水道长度为横轴(起点为长江入境处),节点值为纵轴作图,得到分析结果。

2 结果与分析

2.1 多年ET时空特征

利用GIS软件栅格计算功能计算得到三峡库区重庆段2000—2014年的多年平均ET(以下简称年均ET)如封三彩图3a所示。统计发现三峡库区重庆段地表蒸散的年均ET为749.0 mm。图4为三峡库区重庆段沿长江水系的蒸散量剖面线。结合封三彩图3a和图4易知,三峡库区重庆段年均ET有由西向东增加的趋势,样带分析结果表明这种增加趋势在 $p<0.01$ 水平上有统计学意义;并且整个样带线可分为两段,两段的交界处大致为“长寿—涪陵”一带,距离长江进入研究区处约265 km,与库尾和库腹空间划分一致。库尾地区的年均ET仅为652.9 mm,远低于库腹地区年均ET(770.5 mm);但库尾地区的年均ET空间变异系数为8.90%,远大于库腹地区的ET空间变异系数(2.50%)。

包括库尾和库腹在内的三峡库区重庆段2000—2014年ET的年际变化如图5所示。研究区整体ET波动范围为654.7~801.3 mm,其中超出年均ET的年份主要集中在2002—2009年,这也是重庆市退耕还林工程的主要实施年份段。研究区中库尾和库腹的ET变化与库区整体变化趋势相似,均表现为大致地先升高(2000—2002年)后降低(2003—2014年)趋势。

封三彩图3b为蒸散量年际变化趋势图。经统计,三峡库区重庆段81.14%的区域中ET变化不明显;ET存在统计学意义上减少($p<0.05$)的区域面积占库区总面积的14.5%,而ET存在统计学意义上增加($p<0.05$)的区域面积占库区总面积的4.34%。从空间分布上看,ET存在统计学意义上减少

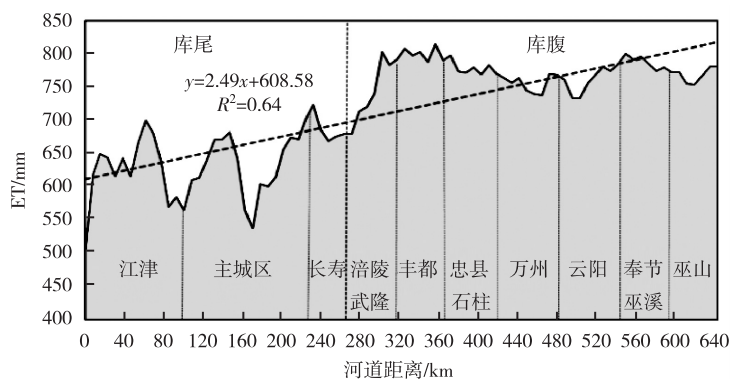


图4 年均ET空间分布剖面

Fig. 4 Profile map of the annual mean evapotranspiration

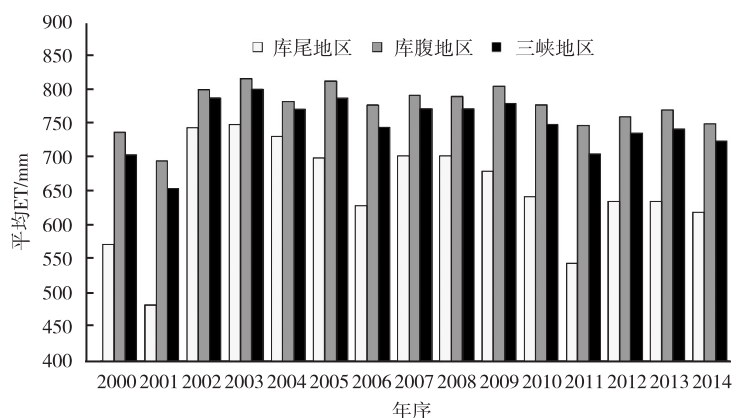


图5 2000—2014的ET年际变化

Fig. 5 Annual variation of evapotranspiration from 2000 to 2014

($p < 0.05$) 的栅格单元有南北两个明显分布带:南部以涪陵区、武隆区为中心沿长江南岸向两侧延伸,北部从忠县到巫山县沿长江分布。ET 存在统计学意义上增加($p < 0.05$)的区域则聚集在开州区北侧和巫溪县。

2.2 月尺度 ET 时空分布

三峡库区重庆段 2000—2014 年的月尺度 ET 如图 6 所示。从中可以看出,三峡库区重庆段的年内 ET 存在着显著的单峰变化趋势:从 1 月份开始明显升高,到 7 月份达到全年峰值,在 7 月份后则明显下降。对 2000—2014 年的各月 ET 进行统计后发现,此期间各年份的 1—7 月 ET 总和的平均值占年均 ET 的 59.49%,明显大于各年份的 7—12 月 ET 总和的平均值占年均 ET 的比例(40.51%)。

选择 4 个典型月份即 1、4、7 和 10 月的研究区 ET 数据从季节变化角度进一步分析 ET 月尺度时空分布特征。如封三彩图 7a-d 所示。三峡库区重庆段不同季节 ET 空间分布差异明显。以 1 月份为例的冬季 ET 在 4 个季节 ET 中最低(29.1 mm),这与研究区冬季多雾、低温的气候特征有关。在冬季,研究区 ET 空间分布较为均衡,ET 空间变异系数为 14.4%,库腹与库尾的 ET 间差异并不明显。在春季(以 4 月份为例),由于气温回升,农作物及自然植被需水量开始增加,此期间 ET 处于 33.3~125.6 mm 之间,平均值为 53.3 mm;此时库尾和库腹之间的 ET 分布差异已十分明显,高值区主要分布于库腹的植被覆盖较好的山地,库区整体 ET 空间变异系数增加到 20.15%。相较于春季,夏季(以 7 月份为例)三峡库区重庆段日照充足,气温较高,降雨量大,6—8 月的降水量占全年降水的 45.54%^[22],ET 在研究区范围内得到明显提升,尤其在库尾农田密集区的提升更为明显;夏季研究区 ET 多年平均值为 117.4 mm,空间变异系数为 16.07%,库尾、库腹之间差异又有所减弱。进入秋季(以 10 月份为例)之后,由于降温以及日照条件变差,三峡库区重庆段 ET 开始降低,平均值为 42.3 mm;此时研究区 ET 空间变异系数为 9.28%,蒸散量分布空间差异减少到全年最低。总体而言,三峡库区重庆段 ET 年内变化特征与该区域水热季节性变化规律基本一致,按一年中各季节 ET 占年总 ET 的百分比由高到低对各个季节进行排序,依次为:夏季(42.79%)、春季(22.60%)、秋季(22.53%)、冬季(12.00%)。

2.3 不同地表覆盖类型的 ET 特征

利用 GIS 空间分析功能,将地表覆盖类型图与年均 ET 进行空间叠置,统计各个覆盖类型内栅格单元 ET 的平均值,结果如图 8 所示。从中可以看出,三峡库区重庆段森林生态系统即乔木林地和灌木林地的 ET 较高,其中以灌木林地 ET 最高(达到 772.6 mm),乔木林地 ET 次之(765.4 mm);两者总面积达到研究区面积的 58.61%,是决定三峡库区重庆段 ET 的主要地表覆盖类型。草地生态系统即草地的 ET 与乔木林地 ET 接近,为 763.6 mm。这一结果不同于草地系统 ET 小于林地系统 ET 的一般规律^[19]。这一现象可解释为:三峡库区重庆段草地面积较少,仅占研究区总面积的 9.1%;草地集中分布在库腹东部山区,以原生的山地草甸及次生灌丛草地为主,单位面积产草量较高^[24]。耕地面积占研究区总面积的 28.1%,ET 较低,为 713.5 mm。其他稀疏植被的 ET 相对较低,且这一类型的地表覆盖类型面积占研究区总面积的比例少,仅有 0.05%,因此对三峡库区重庆段 ET 的影响不明显。综合来看,不同地表覆盖类型按 ET 值大小由高到低排序依次为:灌木林地、乔木林地、草地、耕地、其他稀疏植被。林地、草地和耕地生态系统占研究区总面积的 95.8%,它们的地带性分布在很大

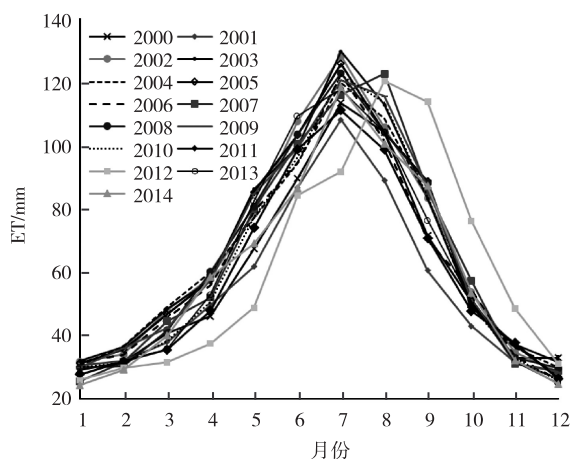


图 6 ET 年内分布特征

Fig. 6 Monthly changes of the evapotranspiration

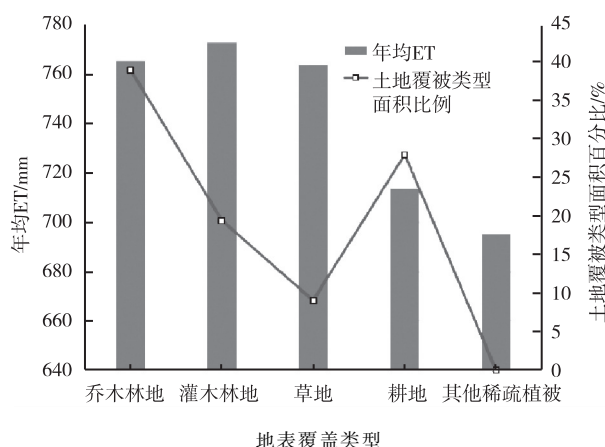


图 8 不同地表覆盖类型下的 ET

Fig. 8 The annual mean evapotranspiration under different surface cover types

程度上决定了三峡库区重庆段 ET 的分布规律。例如林地和草地生态系统主要分布在库腹地区,如大巴山、武陵山、方斗山等山区的植被覆被条件较好,ET 也相对较高,而库尾地区耕地相对聚集,同时 ET 也较低。

2.4 随地形因素的 ET 分异特征

地形因子是决定区域水热分布的重要因素。本研究发现,随着海拔的升高,研究区 ET 呈先增加后减少的趋势,二者的关系符合对数函数模型($p < 0.001$)(图 9)。这种先增后减的趋势可解释为:三峡库区重庆段高海拔地区森林生态系统分布相对集中,因此易产生较大的 ET;然而,随着海拔进一步升高,气温的温度也随之降低,这必然会使 ET 减少。图 9 还显示,上述趋势的转折点出现在 1 750 m 附近。本研究统计结果表明,三峡库区重庆段 95.90% 的蒸散量发生在海拔 0~1 750 m 范围内,因此研究区海拔大于 1 750 m 的区域中因海拔升高而导致 ET 的减少可忽略不计。

图 10 显示了坡度对 ET 的影响。随着坡度的增加,ET 逐渐升高,二者的关系也符合对数函数模型($p < 0.001$)。并且,坡度在 $0^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 范围增加时 ET 升高的速率最大,坡度大于 15° 之后这一速率逐渐放缓,坡度大于 45° 时 ET 与坡度空间耦合关系逐渐消失。本研究发现,三峡库区重庆段坡度小于 45° 的区域贡献了 99% 的 ET,并且该坡度范围内对数函数拟合的 ET-坡度关系方程的决定系数达到 $R^2 = 0.75$ 。综合来看,三峡库区重庆段海拔和坡度因子与 ET 的关系均具有较为严格的规律可循,对于该区 ET 的后续研究具重要参考价值。

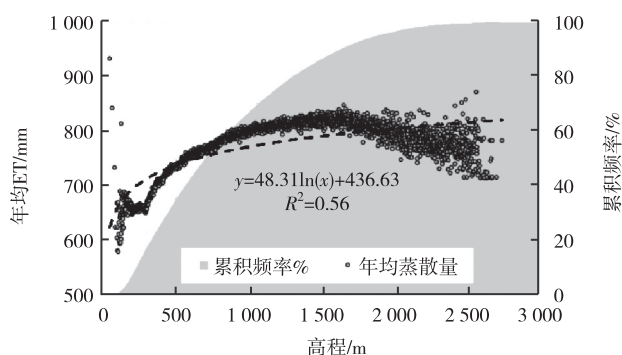


图 9 海拔变化对年均 ET 的影响

Fig. 9 The impacts of the elevation on the annual mean evapotranspiration

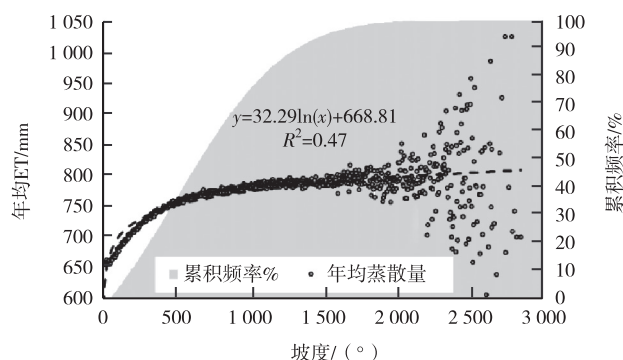


图 10 坡度因子对 ET 的影响

Fig. 10 The impacts of slope on the annual mean evapotranspiration

3 结论

采用 MOD16-ET 产品分析了三峡库区重庆段 ET 时空分布特征及它与土地利用/覆被、地形的空间耦合规律,得到主要结论如下:

1) 2 000—2014 年三峡库区重庆段年均 ET 为 749.0 mm。从空间分布上来看,ET 有由西向东增加的趋势,沿长江 ET 剖面线的陡增点(“长寿—涪陵”一带)与库尾、库腹分界点重合。库腹地区蒸散量(770.5 mm)明显大于库尾地区(652.9 mm)。从年际变化上来看,三峡库区重庆段 ET 大致呈现先升高(2000—2002 年)后降低(2003—2014 年)的变化趋势。ET 明显减少区域有南北两个明显的分布带:南部以涪陵、武隆为中心沿长江南岸向两侧延伸,北部从忠县到巫山沿长江分布。

2) 三峡库区重庆段 ET 年内变化特征与该区域水热季节性变化规律基本一致。在月尺度上 ET 存在先增大后减少的单峰变化趋势,7 月 ET 最大,1、12 月份 ET 最小;在季节尺度上,按一年中研究区各季节 ET 占年总 ET 的百分比由高到低对各个季节进行排序,依次为:夏季(42.79%)、春季(22.60%)、秋季(22.53%)、冬季(12.00%)。按一年中各季节 ET 变异系数由高到低对各个季节进行排序,依次为:春季(20.15%)、夏季(16.07%)、冬季(14.40%)、秋季(9.28%)。

3) 三峡库区重庆段不同地表覆盖类型按 ET 值大小由高到低进行排序,依次为:灌木林地、乔木林地、草地、耕地、其他稀疏植被。前 4 种地表覆盖类型的地带性分布在很大程度上决定了三峡库区重庆段 ET 的分布规律。三峡库区重庆段 ET 与海拔、坡度两个地形因子在空间分布上存在高度耦合,这一结果可为该区 ET 的后续研究提供重要参考。

参考文献:

- [1] 位贺杰,张艳芳,朱妮. 基于 MOD16 数据的渭河流域地表实际蒸散发时空特征[J]. 中国沙漠, 2015, 35(2): 415-422.
WEI H J, ZHANG Y F, ZHU N. Spatial and temporal characteristics of ET in the Weihe river basin based on MOD16 data[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(2): 415-422.
- [2] 唐登银,程维新,洪嘉琰. 我国蒸发研究的概况与展望[J]. 地理研究, 1984, 3(3): 84-97.
TANG D Y, CHENG W X, HONG J L. A review: evaporation study in China[J]. Geographical Research, 1984, 3(3): 84-97.
- [3] 尹云鹤,吴绍洪,赵东升. 1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1471-1481.
YIN Y H, WU S H, ZHAO D S. Impact of climate change on actual evapotranspiration on the Tibetan plateau during 1981—2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1471-1481.
- [4] SCHIMEL D S, BRASWELL B, PARTON W. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1997, 94(16): 8280-8283.
- [5] COX P M, BETTS R A, JONES C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model[J]. Nature, 2000, 408(6809): 184-187.
- [6] MAHMOOD R, HUBBARD K G. Simulating sensitivity of soil moisture and evapotranspiration under heterogeneous soils and land uses [J]. Journal of Hydrology, 2003, 280(1): 72-90.
- [7] 刘世荣,孙鹏森,温远光. 中国主要森林生态系统水文功能的比较研究[J]. 植物生态学报, 2003, 27(1): 16-22.
LIU S R, SUN P S, WEN Y G. Comparative analysis of hydrological functions of major forest ecosystems in China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2003, 27(1): 16-22.
- [8] 刘昌明,王会肖. 土壤-作物-大气界面水分过程与节水调控 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
LIU C M, WANG H X. Soil-plant-atmosphere continuum interface and water saving control [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [9] MO X, LIU S. Simulating temporal and spatial variation of evapotranspiration over the Lushi basin [J]. Journal of Hydrology, 2004, 285(1): 125-142.
- [10] 张仁华,孙晓敏,刘纪远. 定量遥感反演作物蒸腾和土壤水分利用率的区域分异 [J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2001, 31(11): 959-968.
ZHANG R H, SUN X M, LIU J Y. Regional differentiation of quantitative estimate crop transpiration and soil water use efficiency by using remote sensing [J]. Science in China: Series D, 2001, 31(11): 959-968.
- [11] JACOB F, OLIOSSO X F. Mapping surface fluxes using airborne visible, nearinfrared, thermal infrared remote sensing data and a spatialized surface energy balance model [J]. Agronomie, 2002, 22(6): 669-680.
- [12] LI F, LYON S T. Remote estimation of regional evapotranspiration [J]. Environmental Modelling & Software, 2002, 17(1): 61-75.
- [13] MU Q, HEINSCH H A, ZHAO M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 111(4): 519-536.
- [14] MU Q, ZHAO S W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1781-1800.
- [15] 孙亮,孙睿,杨世琦. 利用 MODIS 数据计算地表蒸散 [J]. 农业工程学报, 2009, 25(13): 23-28.
SUN L, SUN R, YANG S Q. Estimation of land surface evapotranspiration using MODIS data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(2): 23-28.
- [16] 刘晓冉,程炳岩,李国平. 三峡库区夏季旱涝变化特征及成因 [J]. 应用气象学报, 2010, 21(5): 590-597.
LIU X R, CHENG Y B, LI G P. Variation characteristics and cause of the flood and drought in the Three Gorges area in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2010, 21(5): 590-597.
- [17] 王贤,张洪江,吕相海. 基于 CoupModel 的三峡库区典型农林地水量平衡模拟 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 140-149.
WANG X, ZHANG H J, LÜ X H. Water balance models of typical forestland and farmland in Three Gorges reservoir area with CoupModel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 140-149.
- [18] 熊友胜,杨艳,董霄. 重庆丘陵山区参考作物蒸散量的确定及气候影响因素分析 [J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 11-15.
XIONG Y S, YANG Y, DONG X. Determination of reference evapotranspiration and related climate factors analysis in hilly area of Chongqing [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 11-15.
- [19] 何毅,王飞,穆兴民. 三峡库区蓄水前后区域气象要素变化研究 [J]. 人民黄河, 2012, 34(10): 55-58.
HE Y, WANG F, MU X M. Research on variation of the meteorological elements before and after impoundment of the Three Gorges reservoir [J]. Yellow River, 2012, 34(10): 55-58.

- [20] 李孝坤. 重庆三峡库区生态经济区农业生态环境问题与重建研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, 16(2): 97-101.
- LI X K. The problem and rehabilitation of agriculture and ecological environment in the ecological economic zone of the Three Gorges reservoir in Chongqing city[J]. Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, 16(2): 97-101.
- [21] 李月臣, 刘春霞, 闵婕. 三峡库区生态系统服务功能重要性评价[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 168-178.
- LI Y C, LIU C X, MIN J. RS/GIS-based integrated evaluation of the ecosystem services of the Three Reservoir area (Chongqing section)[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 168-178.
- [22] 嵇涛, 刘睿, 杨华. 多源遥感数据的降水空间降尺度研究: 以川渝地区为例[J]. 地球信息科学学报, 2015, 17(1): 108-117.
- JI T, LIU R, YANG H. Spatial downscaling of precipitation on using multi-source remote sensing data: a case study of Sichuan-Chongqing region[J]. Journal of Geoinformation Science, 2015, 17(1): 108-117.
- [23] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学, 2014, 16(6): 979-988.
- HE T, SHAO Q Q. Spatial-temporal variation of terrestrial evapotranspiration in China from 2001 to 2010 using MOD16 products[J]. Journal of Geo-information Science, 2014, 16(6): 979-988.
- [24] 中国三峡建设年鉴编纂委员会. 三峡库区近、中期农业和农村经济发展总体规划(1995—2010 年)[M]. 北京: 中国三峡出版社, 1996.
- China Three Gorges Construction Yearbook Compilation Committee. Near, medium agriculture and rural economic development plan in the Three Gorges reservoir area[M]. Beijing: China Three Gorges Press, 1997.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

The Temporal and Spatial Patterns of Evapotranspiration in Three Gorges Reservoir Area (Chongqing) from 2000 to 2014

LIU Rui, PENG Yao, XIAO Linlin

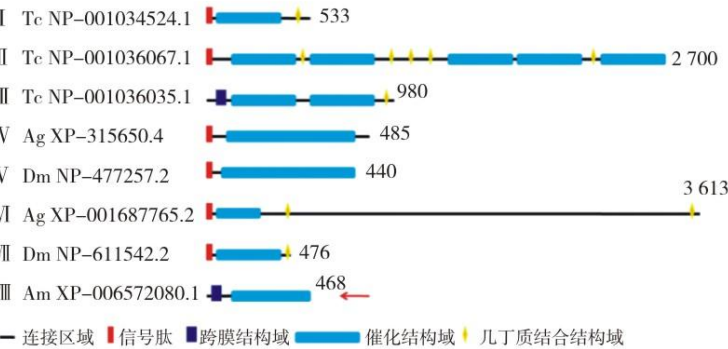
(Chongqing Key Laboratory of Earth Surface Processes and Environmental Remote Sensing in Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Purposes] It is aimed to study the temporal and spatial characteristics of evapotranspiration in the Three Gorges reservoir area (Chongqing) from 2000 to 2014. [Methods] Based on the MOD16-ET product, and under support of GIS technology, trend analysis method and transect analysis were used to quantitatively analyze the temporal and spatial patterns of evapotranspiration and their spatial relationships with land covers and topography. [Findings] It was found that from 2000 to 2014, the annual mean evapotranspiration of the study area was 748.95 mm with a basic spatial characteristic of “lower in west and higher in east”. The “suddenly increase point of Changshou-Fuling” in the ET profile map was anastomose to the demarcation point between “tail” and “belly” of Three Gorges reservoir area. The annual variation of evapotranspiration showed an overall first increasing and then decreasing trend. The areas which experienced the decrease of evapotranspiration at a significant level or extremely significant level accounted for 14.5% of the total area of Three Gorges Reservoir Area, and the corresponding value of increasing part was 4.34%. The inter-annual variation of evapotranspiration was mainly agreement with the seasonal changes of the hydrothermal condition. At the monthly scale, the mean evapotranspiration first increased and then decreased. The largest evapotranspiration occurred in July (117.38mm). The order of annual mean of evapotranspiration in different land use/land cover types was: shrub>arbor>grass>farmland>other land with sparse vegetation. Land use/land cover types, elevation and slope had a tight-fit spatial relationship with evapotranspiration. [Conclusions] The temporal and spatial characteristics of evapotranspiration showed obvious regulation and it was influenced by land cover and topography significantly. The findings are of great significance to analysis of the cause of drought and flood, to guide water storing of three gorges dam, and to establish the rational allocation model for ecological water demand.

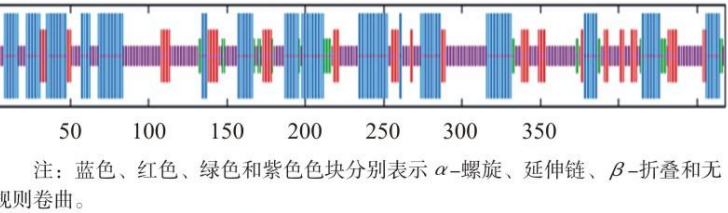
Keywords: Three Gorges reservoir area (Chongqing); evapotranspiration; spatial and temporal distribution; land use/land cover; topography

(责任编辑 方 兴)

(接正文47~48页)



注：Am-意大利蜜蜂，Ag-冈比亚按蚊，Dm-黑腹果蝇，Tc-赤拟谷盗。
图3 昆虫几丁质酶GH18家族结构域示意图
Fig. 3 Schematic diagram of domain architecture of GH18 family chitinase



注：蓝色、红色、绿色和紫色色块分别表示 α -螺旋、延伸链、 β -折叠和无规则卷曲。
图4 意大利蜜蜂AmCht11蛋白二级结构预测
Fig. 4 Secondary structure analysis of AmCht11 protein of *A. mellifera*

(接正文48页)

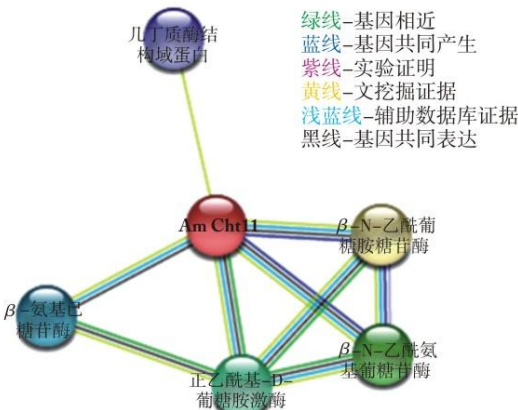


图6 与意蜂AmCht11蛋白相互作用靶蛋白的预测
Fig. 6 Prediction of the proteins interact with AmCht11 protein from *A. mellifera*

(接正文76页)

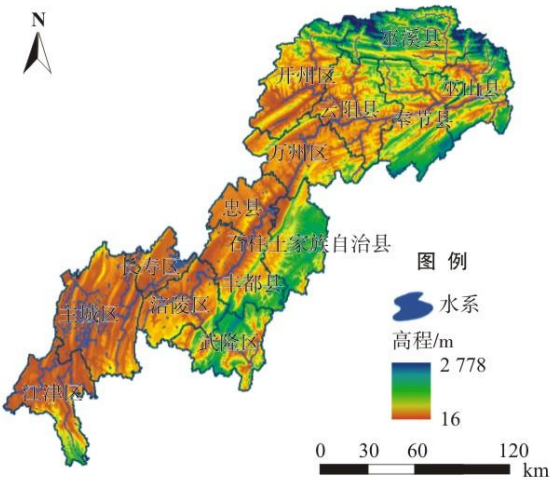
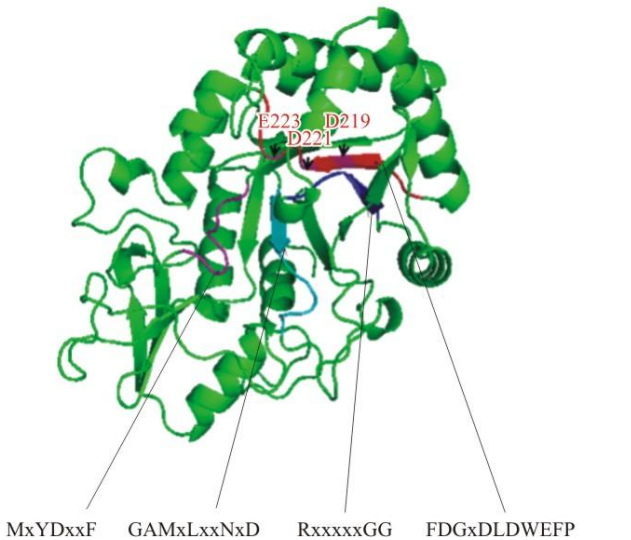
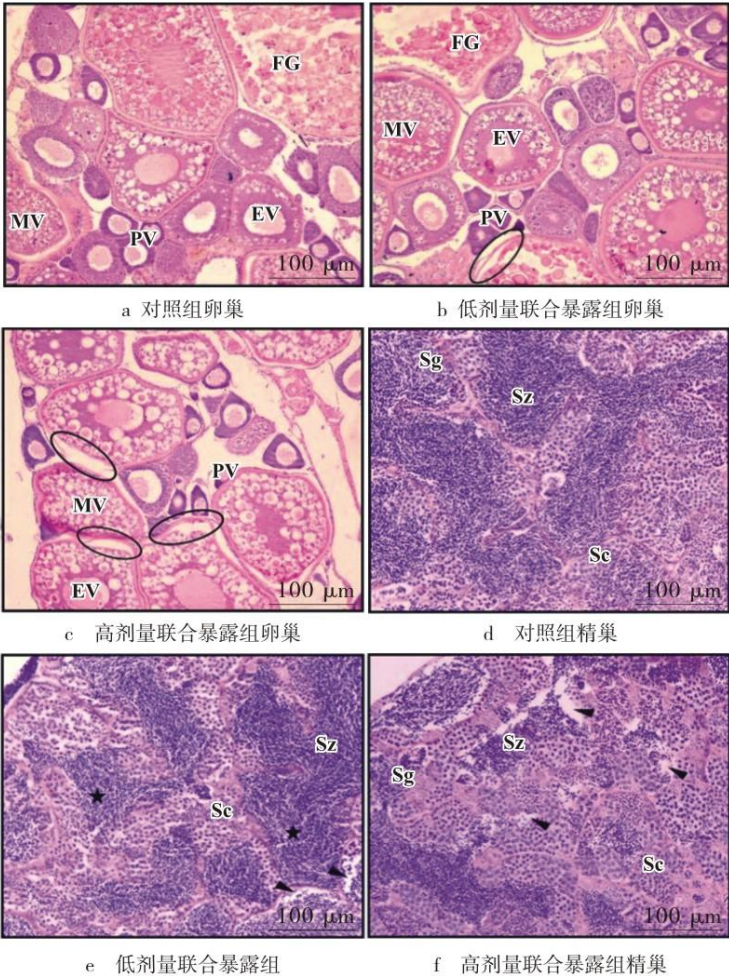


图1 研究区位置及高程
Fig. 1 Location and the DEM of the study area



注：D219和D221分别表示第219，221位天冬氨酸；E223表示第223位谷氨酸。MxYDxxF, GAMxLxxNx, RxxxxxGG和FDGxDLDWEFP为GH18家族保守氨基酸基序。
图5 意蜂AmCht11蛋白的3D结构模型预测
Fig. 5 Predicted 3D structural model of AmCht11 protein from *A. mellifera*

(接正文60页)



注：EV-卵黄发生早期；MV-卵黄发生中期；FG-成熟卵母细胞；PV-卵黄生成前期；Sg-精原细胞；Sc-精母细胞；Sz-精子；椭圆-卵母细胞膜与滤泡细胞层分离；五角星-精子紊乱；黑色三角-空腔。
图2 汞镉联合暴露对成年斑马鱼卵巢和精巢组织学的影响
Fig. 2 Effects of combined exposure to Hg and Cd on histology of the ovary and testis in adult zebrafish

(接正文77~78页)

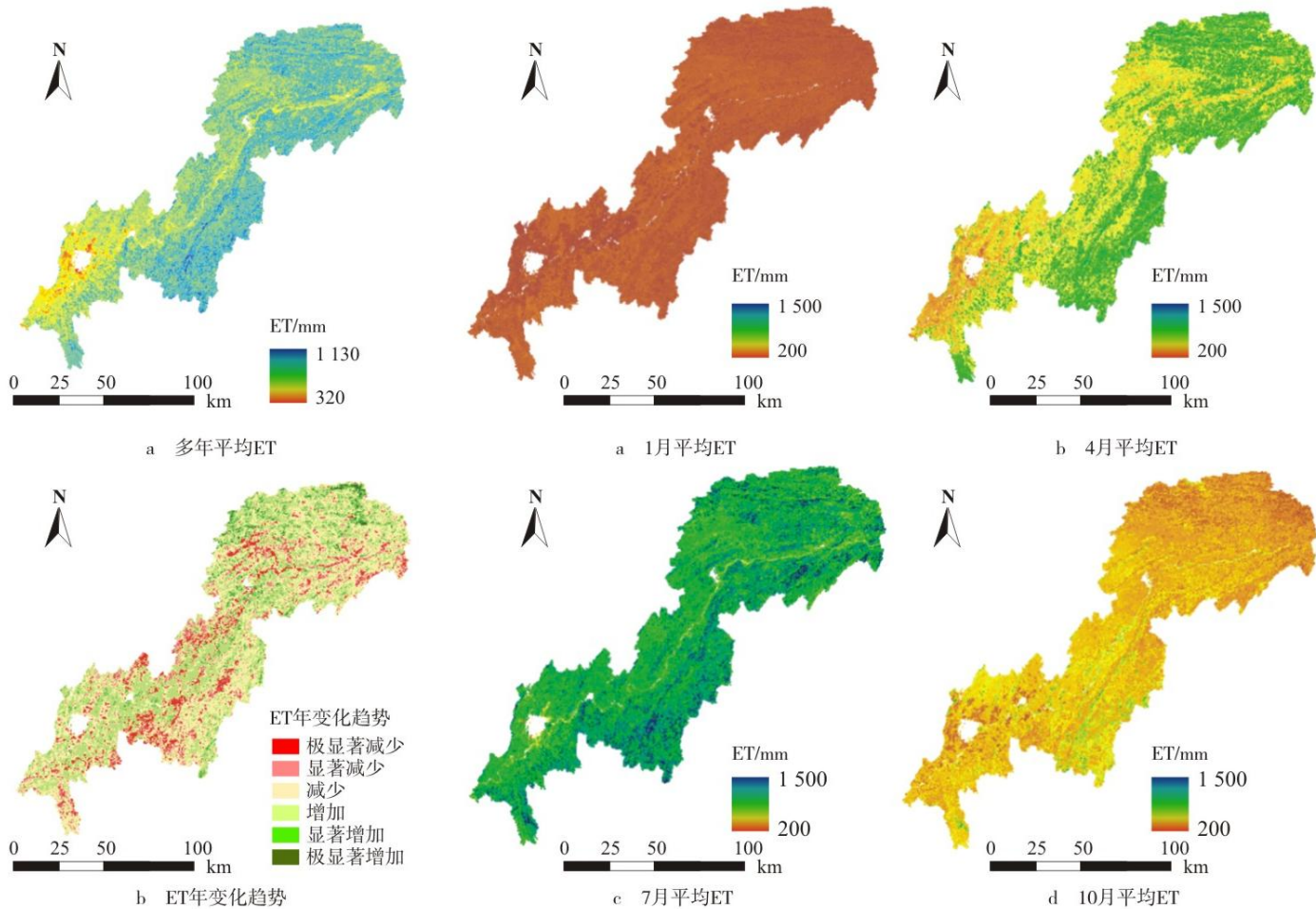


图3 2000—2014平均ET及年变化趋势
Fig. 3 The mean and the annual variation of evapotranspiration from 2000 to 2014

图7 典型月份的ET空间分布
Fig. 7 The spatial distribution of evapotranspiration in typical months

(接正文85页)

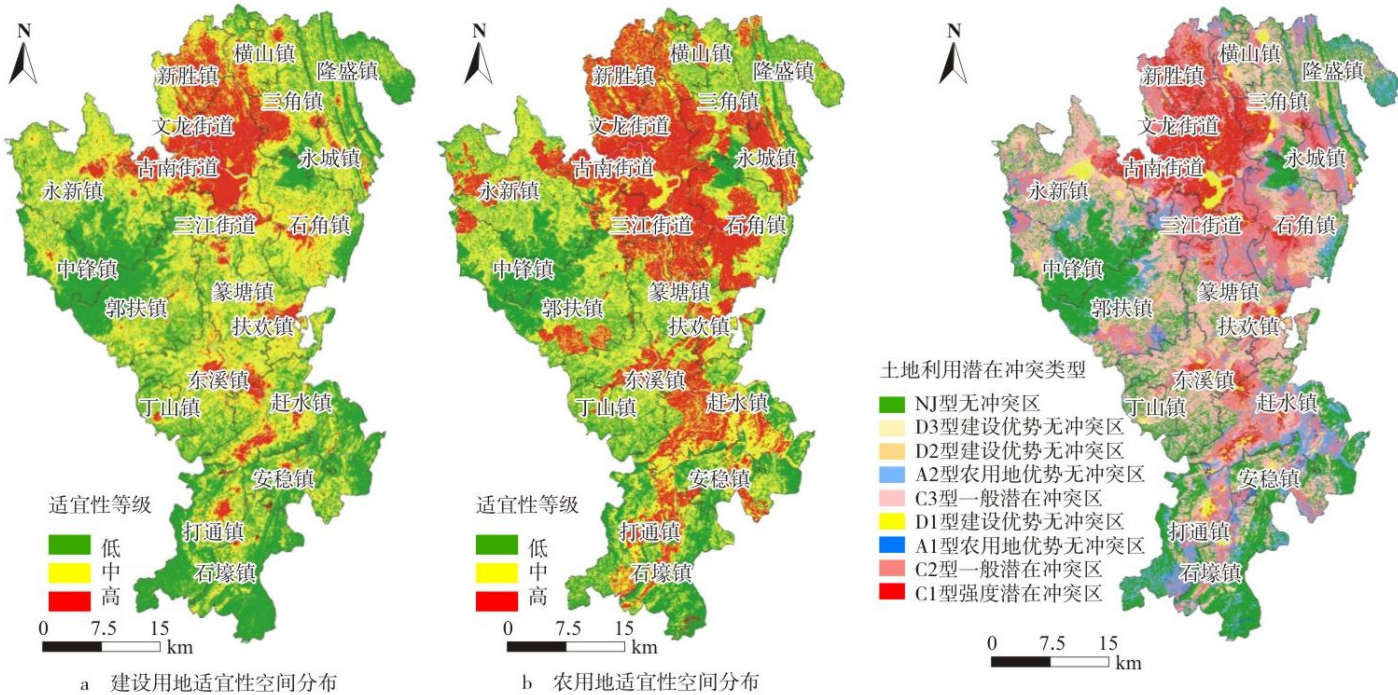


图2 各类用地适宜性空间分布
Fig. 2 The location of various types of land used suitability

图3 土地利用潜在冲突类型分布
Fig. 3 Distribution of potential land use conflict identification