

邱康俊,温华洋,王 根. 基于概率密度匹配的潜在蒸散量估算[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):204-208.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.051

# 基于概率密度匹配的潜在蒸散量估算

邱康俊,温华洋,王 根

(安徽省气象信息中心,安徽合肥 230031)

**摘要:**利用安徽省1998—2015年日气象资料,通过对日大型蒸发量和日潜在蒸散量的相关性和差异性进行分析,表明利用日大型蒸发量估算潜在蒸散量是可行的。由1998—2013年日数据计算大型蒸发量与潜在蒸散量概率密度关系,通过概率密度匹配估算2014—2015年的日潜在蒸散量,并与Penman-Monteith公式计算值对比分析验证,结果表明,安徽省全省各站有明显的年月日变化,日、月的相对误差较大,而年的相对误差较小。单站年相对误差最小为0.2%,最大为21.3%。除了最大值21.3%外,其他各站年相对误差均在11%以下,平均相对误差为2.7%;对于安徽省全省而言,年平均相对误差为2.71%。因此本研究提出的概率密度匹配法在安徽省区域及单站的潜在蒸散量估算中有一定效果。

**关键词:**大型蒸发量;潜在蒸散量;概率密度匹配;估算

**中图分类号:** S161.4<sup>+</sup>2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0204-04

蒸发皿蒸发量定义为在各种气象条件综合作用下,观测区域自由水面的最大可能蒸发量。气象站测定的蒸发量是水面蒸发量,是指在一定口径的蒸发皿中,在一定时间间隔内因蒸发而失去的水层深度。测量蒸发量的仪器有E<sub>601B</sub>型蒸发皿和小型蒸发皿。潜在蒸散量是假设作物高度为0.12 m,冠层阻力、反照率分别为70 s/m、0.23的参考冠层的蒸散量,相当于生长旺盛、长势一致、完全覆盖地面且水分供应充足的开阔绿色草地的蒸散量。两者表征不同下垫面地表与大气环境的水汽交换,是整个地表水资源循环的重要组成部分。近年来国内外对蒸发皿蒸发与潜在蒸散的变化趋势<sup>[1-9]</sup>及其原因的研究较多<sup>[10-14]</sup>,大多数学者认为两者在不同区域水汽交换的动力条件和水汽条件下共同作用,其变化趋势及变化的主要原因不尽相同。

国内外学者对用蒸发皿蒸发量估算潜在蒸散量的研究较多<sup>[15-18]</sup>,通过研究折算系数 $K_p$ 来确定蒸发皿蒸发与潜在蒸散量的具体函数关系。但是在拟合确定折算系数 $K_p$ 的过程中,计算需要的要素较多,当观测站有要素缺测时,不利于潜在蒸散量的计算。因此,在前人研究基础上,拟研究用大型蒸发量直接估算潜在蒸散量的方法。通过大型蒸发量与潜在蒸散量的相关性和差异性分析可知,利用大型蒸发量直接估算潜在蒸散量的方法可行。目前概率密度匹配(probability density function,简称PDF)是一种新的订正技术,该技术不依赖于数据误差产生的原因,只与数据本身概率密度分布有关,在卫星估算降水中得到有效应用<sup>[19]</sup>。

本研究基于安徽省1998—2015年的日气象资料,利用大

型蒸发量通过概率密度匹配PDF估算潜在蒸散量并验证估算效果。

## 1 研究背景

安徽省共有81个国家级台站,选择其中16个E<sub>601B</sub>型大型蒸发观测站(含3个基准站、13个基本站,详见图1),选择的时间段为1998年1月1日至2015年12月31日,涉及到的气象要素包括日平均气温、日最高气温、日最低气温、日平均相对湿度、实际水汽压、平均风速、日照时数及日大型蒸发量。

## 2 研究方法

通过1998—2013年的日资料,利用世界粮农组织推荐修正的Penman-Monteith公式<sup>[20]</sup>计算获得潜在蒸散量 $ET_0$ ,建立日潜在蒸散量与日大型蒸发量概率密度匹配关系。再利用概率密度匹配,对2014—2015年日大型蒸发量 $L$ 进行订正得到估算的潜在蒸散量 $ET'_0$ ,通过与Penman-Monteith公式计算值进行对比分析检验估算效果。

### 2.1 修正的Penman-Monteith公式

$$ET'_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (\theta_s - \theta_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: $ET'_0$ 为日潜在蒸散量,mm/d; $R_n$ 为净辐射,MJ/(m<sup>2</sup>·d); $G$ 为土壤热通量,MJ/(m<sup>2</sup>·d),在计算日蒸散量时, $G = 0$ ; $U_2$ 为2 m处的风速,m/s; $T$ 为平均气温,°C; $e_s$ 、 $e_a$ 分别为计算时段的饱和水汽压、实际水汽压,kPa; $\gamma$ 为湿度计常数,取值为0.065 kPa/°C; $\Delta$ 为饱和水汽压-温度曲线上的斜率,kPa/°C。因实际观测中的测风仪器高度不为2 m,所以需要利用式(2)进行风速转换。不同高度的风速转换为2 m高度处风速 $U_2$ 的公式定义为:

$$\frac{v_2}{v_h} = \frac{4.87}{\ln(67.8h - 5.42)} \quad (2)$$

收稿日期:2017-02-17

基金项目:公益性行业(气象)科研专项(编号:GYHY201406028);安徽省气象科技发展基金(编号:KM201405);安徽省新技术集成项目(编号:AHXJ201505)。

作者简介:邱康俊(1983—),男,四川隆昌人,硕士,工程师,研究方向为气象信息技术。Tel:(0551)62290269;E-mail:qiukangjun@126.com。

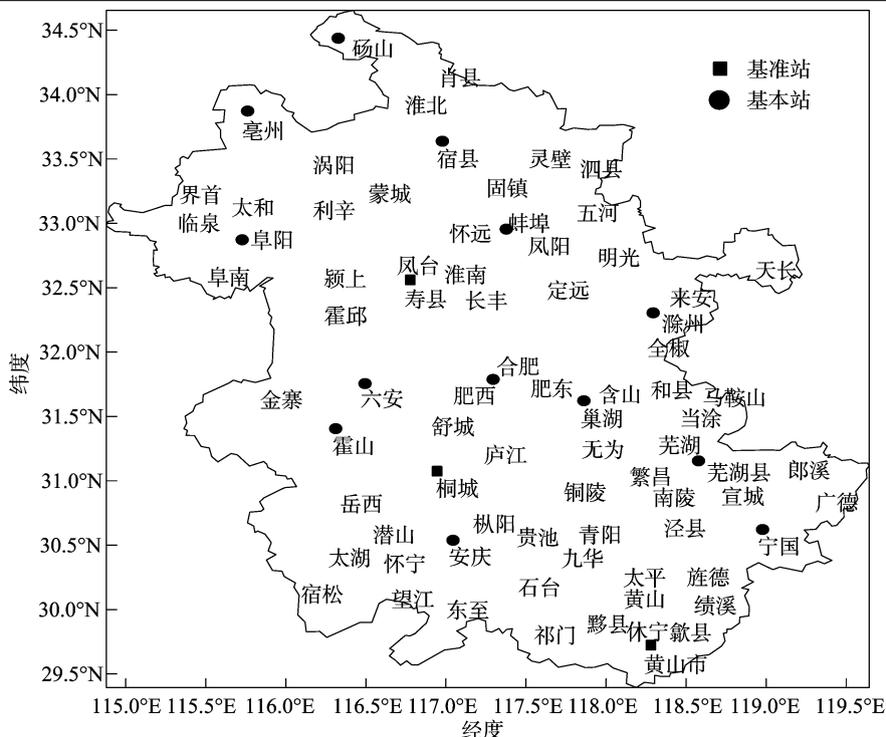


图1 E<sub>601B</sub>型大型蒸发观测站分布

式中： $v_2$  为 2 m 高度处的风速，m/s； $v_h$  为高度  $h$  m 处的风速，m/s； $h$  为测风高度，m。

### 2.2 概率密度匹配

概率密度函数表示瞬时幅值落在某指定范围内的概率，即幅值  $x$  的函数  $f(x)$ 。

$X$  是一个随机变量， $x$  是任意实数，函数  $F(x) = P\{X \leq x\}$  称为  $X$  的累积概率密度分布函数 (cumulative distribution function, 简称 CDF)。根据概率密度函数性质有：

$$F(x) = P\{X \leq x\} = \int_{-\infty}^x f(t) dt. \quad (3)$$

当样本量足够大时，分别得到实际观测大型蒸发量和潜在蒸散量两者稳定的累积概率密度分布函数。从 CDF 中可知，累积概率密度为  $P$  时，对应的实际观测大型蒸发量和潜在蒸散量分别记为  $L(P)$  和  $ET_0(P)$ ，此时两者有稳定的差值：

$$\Delta L(P) = ET_0(P) - L(P). \quad (4)$$

根据概率密度匹配，估算潜在蒸散量  $ET'_0 \approx ET_0(P)$ ：

$$ET'_0 = L(P) + \Delta L(P). \quad (5)$$

### 2.3 误差分析

为评价概率密度匹配算法估算潜在蒸散量的精度，计算估算潜在蒸散量  $ET'_0$  与 Penman - Monteith 计算的潜在蒸散量  $ET_0$  之间的平均绝对误差  $\alpha$ 、均方根误差  $\sigma$  和平均相对误差  $\beta$ ，相应公式如下：

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |ET'_0 - ET_0|; \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET'_0 - ET_0)^2}; \quad (7)$$

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (ET'_0 - ET_0) / ET_0 \times 100. \quad (8)$$

## 3 潜在蒸散量与大型蒸发量的相关性及其差值时空分布特征

通过研究安徽省 16 个大型蒸发量观测站的潜在蒸散量

与实际观测大型蒸发量的相关性和差值分布特征，发现潜在蒸散量与大型蒸发量有明显的正相关，安徽省全省的平均相关系数为 0.836，且从潜在蒸散量与大型蒸发量的差值时空分布分析可知，其年差值较小，占年潜在蒸散量的比例不超过 10%，进一步说明可以通过大型蒸发量估算潜在蒸散量。

### 3.1 相关性分析

利用日大型蒸发与 Penman - Monteith 公式计算的日潜在蒸散量作相关性分析。由图 2 可知，安徽省全省相关系数整体呈南部高北部低分布，平均值为 0.836，最大值为 0.867，最小值为 0.783，通过置信度 0.01 水平的显著检验，所以潜在蒸散量与大型蒸发量间具有显著的正相关关系。

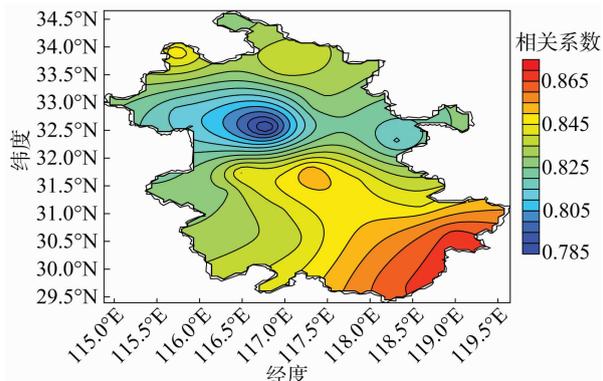


图2  $ET_0$ 与  $L$  的相关系数

### 3.2 差值时间分布特征

安徽省多年潜在蒸散量与大型蒸发量差值平均为 65.6 mm，最小值为 24.5 mm，最大值为 131.1 mm。从图 3 可以看出，1998—2015 年潜在蒸散量与大型蒸发量差值年际变化呈减小趋势，变化率为 -3.53 mm/年。由图 4 可知，在月尺度上  $ET_0$  与  $L$  的差值呈现夏季偏高的单峰型分布规律，最

大值出现在7月,为21.9 mm,11月最小,为-9.0 mm,其原因为在春夏时节,太阳光照强烈,大型蒸发和潜在蒸散的主要动力来自于太阳,即日照时数越长,地表得到的能量越多,蒸散力就越强,但由于水的比热值较草地大,所以在同样的日照条件下,大型蒸发量就小于潜在蒸散量,因此两者差值会在春夏时节增大;而在秋冬季,在太阳辐射减弱的前提下,地表和植物的蒸散量大小主要与风速和实际水汽压有关,当风速和实际水汽压条件一致时,不同下垫面与周边大气环境水汽交换强烈程度不一,纯水面因为没有遮挡物,在同样的蒸发条件下,其蒸发的水量较以草地为下垫面的潜在蒸散量大,所以在秋冬季节,两者差值较小。

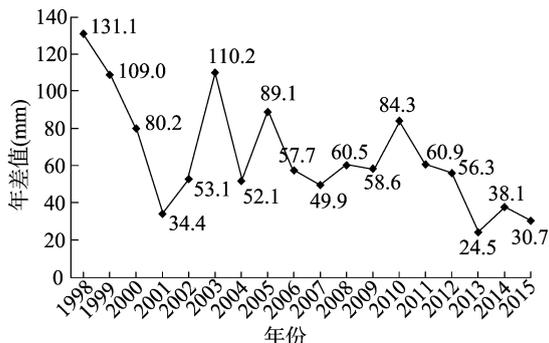


图3  $ET_0$  与 L 年差值的变化

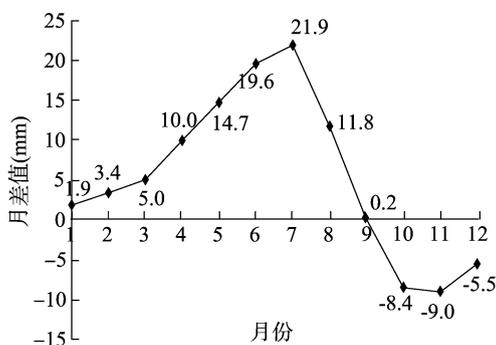


图4  $ET_0$  与 L 月差值的变化

### 3.3 差值空间分布特征

由图5可知,潜在蒸散量与大型蒸发量年差值、日月年差值空间分布一致,呈散点式多中心分布,总体上中北部大,南部小,中北部有最大值出现,最小值在西南部。年差值在-40~150 mm,平均值为65.6 mm,占年潜在蒸散量的7%,最小值为-39.6 mm,最大值为145.4 mm。

## 4 潜在蒸散量估算研究

前文对潜在蒸散量与实际观测大型蒸发量的相关性和差值分布特征分析表明,潜在蒸散量与大型蒸发量有明显的正相关,安徽省平均相关系数为0.836,且两者年差值较小,差值占年潜在蒸散量的比例不超过10%,所以可以通过大型蒸发量估算潜在蒸散量。

在安徽省16个气象站的1998—2013年日数据计算潜在蒸散量的基础上,通过与实际观测日大型蒸发量的累积概率密度分析,建立日潜在蒸散量与日大型蒸发量概率密度匹配关系。利用概率密度匹配,将2014—2015年大型蒸发量订正得到估算的潜在蒸散量,并通过与Penman-Monteith公式计

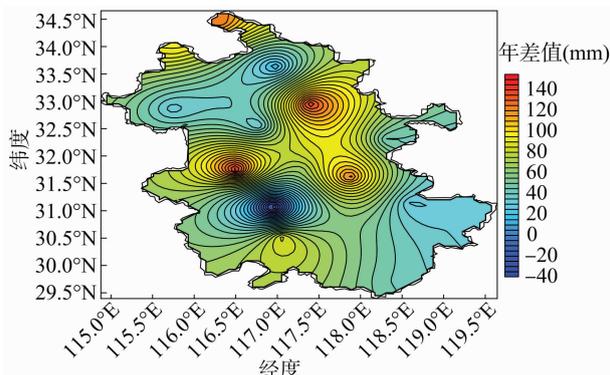


图5  $ET_0$  与 L 年差值分布

算值进行对比分析检验估算效果。

### 4.1 $ET'_0$ 与 $ET_0$ 的累积概率密度特征

根据日值累积概率密度分布,所有站点估算潜在蒸散  $ET'_0$  与 Penman-Monteith 计算的潜在蒸散  $ET_0$  两者的累积概率密度曲线趋势一致,说明  $ET'_0$  与  $ET_0$  的分布形态一致。从取值上可以分成2类,一是较吻合型(图6),即潜在蒸散量与大型蒸发量两者随机取到某个值的概率基本一致,二是存在一定的系统偏差型(图7),即潜在蒸散量与大型蒸发量两者随机取到某个值的概率有偏差。

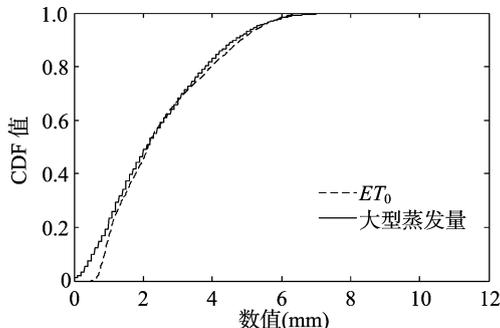


图6 较吻合型曲线

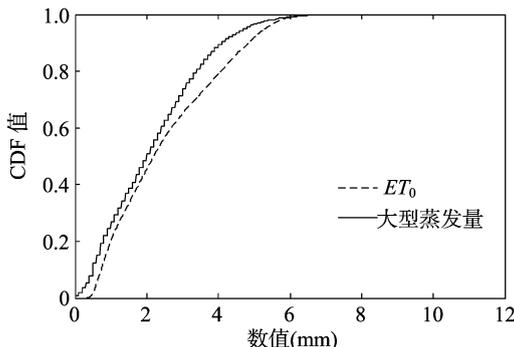


图7 存在系统偏差型曲线

### 4.2 估算效果检验

由表1对16个站点的潜在蒸散量估算效果检验误差可见,除了巢湖58326站点的估算误差较大,其他站的估算值的年相对误差都小于11%,其中相对误差  $\beta$  在-10.3%~21.3%,平均值为2.7%;绝对误差  $\alpha$ 、均方根误差  $\sigma$  的平均值分别为47.4、14.4 mm。所以对于单站而言,该算法估算潜在蒸散量精度较高。

由图8、图9可知,就全省平均而言,在时间序列上,  $\beta$  在

**表 1 2014—2015 年安徽省全省 16 个站潜在蒸散量估算效果检验统计**

站号	年平均绝对误差 (mm)	年最小误差 (mm)	年最大误差 (mm)	年标准差 (mm)	年平均相对误差 (%)
58015	16.10	-49.5	17.3	47.2	-2.40
58102	69.45	65.9	73.0	5.0	7.30
58122	44.95	-53.2	-36.7	11.7	-4.90
58203	48.50	44.5	52.5	5.7	5.70
58215	14.20	-15.7	-12.7	2.1	-1.60
58221	73.50	71.6	75.4	2.7	8.10
58236	28.25	16.6	39.9	16.5	3.40
58311	38.60	24.1	53.1	20.5	4.40
58314	2.05	-6.9	2.8	6.9	-0.20
58319	1.60	-20.2	23.4	30.8	0.20
58321	21.45	8.0	34.9	19.0	2.50
58326	185.20	173.3	197.1	16.8	21.30
58338	37.65	33.2	42.1	6.3	4.40
58424	28.95	24.0	33.9	7.0	3.20
58436	88.05	-95.7	-80.4	10.8	-10.30
58531	19.90	5.3	34.5	20.6	2.30
平均	47.40	14.1	34.4	14.4	2.71

月尺度上均呈现春夏低、秋冬高的季节性变化规律,冬季(12月至次年2月)最大,为32.6%,春季(3至5月)最小,为-1.3%。全年相对误差 $\beta$ 在2.71%左右,较日月尺度相对误差 $\beta$ 明显减小(表1)。综合考虑相对误差的季节性变化,用概率密度匹配估算春夏季及全年全区潜在蒸散量较为合理。

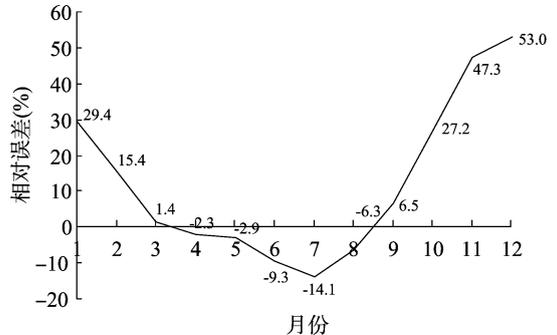
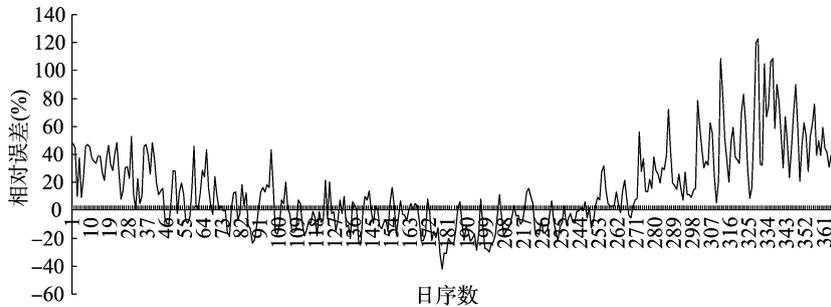


图8 相对误差月变化

**5 总结与展望**

本研究基于相关性、差值时空分析和概率密度匹配 PDF, 利用安徽省 16 个站 1998—2013 年的观测资料, 建立潜在蒸散量与大型蒸发量的概率匹配模型, 估算 2014—2015 年的潜



1月1日的日序数为1, 以此类推

图9 相对误差日变化

在蒸散量。利用 Penman - Monteith 计算 2014—2015 年的潜在蒸散量, 作独立样本检验, 得到如下结论:

(1) 从相关性及差值时空分布特征, 分析潜在蒸散量与实测大型蒸发量的关系, 研究得出两者有很强的正相关, 且年差值平均为 65.6 mm, 占年大型蒸发量的 7%。所以利用大型蒸发量估算潜在蒸散量可行。

(2) 由概率密度匹配估算验证结果来看, 各站年相对误差最小值为 0.2%, 最大值为 21.3%。除了最大值 21.3% 外, 其他各站相对误差都在 11% 以下, 平均相对误差为 2.7%, 因此对于单站而言, 利用大型蒸发量通过概率密度匹配方法可以直接估算潜在蒸散量。

(3) 对全区潜在蒸散量的估算显示, 年相对误差平均为 3%, 综合考虑季节变化, 大型蒸发量可应用到全区春夏季及全年潜在蒸散量的估算。

后期可将安徽省按气候特征进行分区试验, 进一步完善估算方法。

**参考文献:**

[1] 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵, 等. 近 40 年中国气候变化趋势及其同

蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J]. 科学通报, 2005, 50(11): 1125 - 1130.

[2] 邱新法, 刘昌明, 曾 燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4): 437 - 441.  
 [3] 赵福年, 赵 铭, 王 莺, 等. 石羊河流域 1960—2009 年参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化特征[J]. 干旱气象, 2014, 32(4): 560 - 568.  
 [4] 高 歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3): 378 - 387.  
 [5] 倪广恒, 李新红, 丛振涛, 等. 中国参考作物腾发量时空变化特性分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22(5): 1 - 4.  
 [6] 张明军, 李瑞雪, 贾文雄, 等. 中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 798 - 806.  
 [7] 王亚敏, 张 勃, 戴声佩, 等. 河西地区 1960 年至 2008 年潜在蒸发量的时空变化分析[J]. 资源科学, 2010, 32(1): 139 - 148.  
 [8] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(1): 99 - 103.  
 [9] 孙小舟, 封志明, 杨艳昭. 西辽河流域 1952 年至 2007 年参考作物蒸散量的变化趋势[J]. 资源科学, 2009, 31(3): 479 - 484.  
 [10] 尹鹤鹤, 吴绍洪, 戴尔卓. 1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J]. 科学通报, 2010, 55(22): 2226 - 2234.

杨浩,张辉,王少彬. 土地利用/覆盖和植被盖度时空格局变化对城市群热环境的影响[J]. 江苏农业科学,2018,46(16):208-213.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2018.16.052

# 土地利用/覆盖和植被盖度时空格局变化 对城市群热环境的影响

杨浩<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>1</sup>, 王少彬<sup>3</sup>

(1. 北京大学经济学院,北京 100781; 2. 北京市社会科学院,北京 100101; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

**摘要:**运用 WRF 模型进行数值模拟,定量分析 2000—2015 年土地利用/覆盖和植被盖度(LUCC)变化对京津冀城市群气温变化的贡献率。研究表明:(1)LUCC 变化过程导致城市群年均气温降低 0.07℃。其中春季和冬季呈现增温效应,夏季和秋季则呈现降温效应;植被盖度对气温影响排序为:草地>林地>湿地>耕地。(2)土地利用/覆盖变化导致北京市、天津市、廊坊市和唐山市的城市气温增高。该变化过程对季节气温的影响排序为:秋季>春季>夏季和冬季,其中天津市季均增温效应最为明显。而由生态用地转为城镇建设用地的土地利用/覆盖变化对气温的影响强度较大。(3)土地利用/覆盖变化和植被盖度变化对城市群年均的气温贡献值分别为 0.04℃与 -0.11℃。植被盖度变化对区域年均气温的影响力大于土地利用/覆盖变化对区域年均气温的影响力。尽管如此,城市扩展活动对区域气温的影响效果最为显著。

**关键词:**土地利用/覆盖;植被盖度;城市热环境;WRF 模型

**中图分类号:** F301.24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2018)16-0208-06

城市化进程引致的土地利用/覆盖和植被盖度变化改变了地表与大气间的水分和能量交换过程,导致了城市热环境的改变<sup>[1-4]</sup>。而以林地、湿地、草地等土地覆盖类型所形成“城市冷岛”是有效缓解城市热环境恶化的重要影响因素<sup>[5-7]</sup>。随着城市环境问题及城市小气候问题越来越受重视,土地利用/覆盖变化和植被盖度变化与城市热环境之间的形成机制与作用效果等问题愈发受到学术界的重视,现已成为生态学、地理学、气象学、环境科学的重要研究热点之一<sup>[7-8]</sup>。

近年来,大量文献论证了土地利用/覆盖与植被盖度变化对城市热环境的影响。莫新宇等选取苏州作为研究区,分别利用 1986 年和 2004 年 2 个时相的 Landsat5 TM 影像数据对研究区土地利用/覆盖类型进行分类,并采用热红外波段进行地表温度反演,得出了城市热岛范围由老城区向四周成倍扩大,热岛强度由 3.12°增至 4.76°的结论,同时证明了表明热岛效应变化与土地利用时空变化之间具有明显的对应关系<sup>[9]</sup>。李增加等利用 Landsat TM/ETM+ 数据的热红外波段,通过单通道算法,反演西双版纳地区的地表温度,并对西双版纳地表温度演变的规律进行了分析,证明了内旱地、灌木林、有林地、荒草地等植被覆盖对区域热效应贡献较大,水体、水浇地、建设用地、滩涂和水体的热效应贡献较小的结论<sup>[10]</sup>。曹峰等将 WRF 模式应用于枣庄城市的热岛模拟研究中,结果证明,枣庄地区各土地利用类型对城市热岛的贡献率大小排序为:城镇建设用地>农田>林地>未利用地>草地>水体<sup>[11]</sup>。任敏分析了聊城市 2013、2015 年的 TM 和 ETM+ 遥感图像,基于此对聊城市土地利用变化与热岛效用之间的关联进行了定量分析,结果显示研究区内土地利用的变化使得

收稿日期:2018-03-09

基金项目:北京市哲学社会科学基地项目(编号:10AbJG365);北京市社会科学院青年项目(编号:2017B4758);北京市博士后科研项目(编号:2017-zz-092)。

作者简介:杨浩(1983—),男,吉林长春人,博士,讲师,助理研究员,研究方向为土地行政、政府绩效评估、政府经济管理。  
E-mail: yanghaobjdx@aliyun.com。

通信作者:张辉,博士,教授、博士生导师,研究方向为区域经济学、产业经济学、土地经济学。E-mail: nk94zhang@126.com。

[11] 刘小莽,郑红星,刘昌明,等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 资源科学,2009,31(9):1470-1476.

[12] 王素萍. 近 40 年江源区潜在蒸散量变化特征及影响因素分析[J]. 中国沙漠,2009,29(5):960-965.

[13] 曹雯,申双和,段春峰. 西北地区近 49 年生长季参考作物蒸散量的敏感性分析[J]. 中国农业气象,2011,32(3):375-381.

[14] 梁丽乔,李丽娟,张丽,等. 松嫩平原西部生长季参考作物蒸散发的敏感性分析[J]. 农业工程学报,2008,24(5):1-5.

[15] 任芝花,黎明琴,张纬敏. 小型蒸发器对 E-601B 蒸发器的折算系数[J]. 应用气象学报,2002,13(4):508-512.

[16] 周振民. 蒸发皿系数 KP 计算方法研究[J]. 水文,2003,23(1):21-23.

[17] 樊军,王全九,郝明德. 利用小蒸发皿观测资料确定参考作物蒸散量方法研究[J]. 农业工程学报,2006,22(7):14-17.

[18] 段春峰,缪启龙,曹雯,等. 西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J]. 农业工程学报,2012,28(4):94-99.

[19] 宇婧婧,沈艳,潘旻,等. 概率密度匹配法对中国区域卫星降水资料的改进[J]. 应用气象学报,2013,24(5):544-553.

[20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements[M]. Rome:FAO,1998.