

中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集 (2013)

贾立*, 胡光成, 郑超磊, 周杰, 王 昆, 李占胜, 柳钦火*

中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101

摘 要: 地表实际蒸散发既包括土壤和植物表面的水分蒸发和冰雪表面升华, 也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾, 是土壤-植物-大气连续体中水分运动的重要过程, 不仅是水循环和能量平衡的重要组成部分, 也是生态过程与水文过程的重要纽带。中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集 (2013) 是基于多参数化、适用于不同土地覆盖类型的地表蒸散发估算模型 ETMonitor 计算研发得到。所计算的地表蒸散发包括: (1) 植被与土壤组成的混合下垫面, 计算冠层降水截留蒸发、土壤蒸发及植被蒸腾, 其中对于植被冠层的降水截留蒸发, 采用 RS-Gash 模型计算; (2) 水体下垫面, 采用 Penman 公式, 计算水面蒸发; (3) 冰雪下垫面, 采用 Kuzmin 公式, 计算冰雪升华。本数据集的数据类型为整型, 除以 1,000 即为实际日蒸散发 (mm/d)。数据集采用 Sinusoidal Tile Grid 分幅, 共 40 景 (Tile), 每景覆盖的经纬度范围为 $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ 。数据集的时间分辨率为 1 d, 空间分辨率为 1 km, 数据量为 38.22 GB (压缩为 10.4 GB)。

关键词: 中国-东盟; 蒸散发; MuSyQ; ETMonitor

DOI: 10.3974/geodp.2017.03.05

1 前言

地表实际蒸散发 (Evapotranspiration, ET) 既包括土壤和植物表面的水分蒸发和冰雪表面升华, 也包括通过植物表面和植物体内的水分蒸腾, 是一个发生在相当复杂体系内的连续过程。地表蒸散发是水循环的重要环节之一, 由于水分在汽化过程中需要吸收热量 (潜热通量), 因而蒸散发也是地表能量平衡的重要组成部分。此外, 植物光合作用和蒸腾作用是生态系统能量流动与物质循环最重要的生理生态学过程, 地表蒸散发不仅是陆地生态系统中与碳循环相互耦合的重要生态学过程, 也是生态过程与水文过程的重要纽带。因此, 地表蒸散发的研究, 对于了解区域能量平衡、水分循环以及生物地球化学循环具有重要意义。

东盟十国位于亚洲东南部, 包括缅甸、泰国、柬埔寨、老挝、越南、马来西亚、新加坡、文莱、菲律宾、印度尼西亚, 主要分布在中南半岛、马来半岛和马来群岛。其地理位置具有特殊意义, 一方面东盟地处热带, 是亚洲纬度最低的地区, 也是亚洲的赤道部分;

收稿日期: 2015-01-15; 修订日期: 2016-02-19; 出版日期: 2017-09-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2012AA12A304, 2012AA12A305, 2013AA12A301)

*通讯作者: 贾立 I-1457-2014, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, jiali@radi.ac.cn

柳钦火 S-1647-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, liuqh@radi.ac.cn

论文引用格式: 贾立, 胡光成, 郑超磊等. 中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集 (2013) [J]. 全球变化数据学报, 2017, 1(3): 282-289. DOI: 10.3974/geodp.2017.03.05.

数据集引用格式: 贾立, 胡光成, 郑超磊等. 中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集 (2013) [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2015. DOI: 10.3974/geodb.2015.01.11.V1.

另一方面东盟处于亚洲与大洋洲之间的过渡地带，在气候和生物方面均有明显反映。此外，东盟也是太平洋与印度洋的交汇地带，具有明显的湿热气候特征，其中中南半岛为热带季风气候和热带干湿季气候，一年中有明显的旱季和雨季。马来群岛主要为热带雨林气候，终年高温多雨，分布着茂密的热带雨林，是研究区与其他地区的根本差异。

在中国-东盟合作历程中，双方非常注重该地区的环境保护和自然资源的可持续利用，对生态环境的宏观动态监测尤为重视。中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集（2013）^[1]是该区域科学研究重要的产出成果，也是开展生态环境综合评估的重要数据基础。为了清晰数据内涵，本文阐述该数据的元数据信息、研发的基本原理、算法和数据可靠性论证等内容。

2 数据集元数据简介

中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集（2013）（MuSyQ-ET-1km-2013）的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集（2013）元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集（2013）
数据集短名	MuSyQ-ET-1km-2013
作者信息	贾立 I-1457-2014, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, jiali@radi.ac.cn 胡光成 L-6160-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, hugc@radi.ac.cn 郑超磊 L-6182-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, zhengcl@radi.ac.cn 周杰 G-6760-2011, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, zhoujie@radi.ac.cn 王昆 L-6189-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, wangkun@radi.ac.cn 李占胜 L-6882-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, lizs@radi.ac.cn 柳钦火 S-1647-2016, 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, liuqh@radi.ac.cn
地理区域	10°55'12"S-53°32'24"N, 73°37'12"E-141°0'36"E。包括：中国、缅甸、泰国、柬埔寨、老挝、越南、马来西亚、新加坡、文莱、菲律宾、印度尼西亚
数据年代	2013 年
时间分辨率	1 d
空间分辨率	1 km
数据格式	.img (ENVI)
数据量	40 GB
数据集组成	数据集采用 Sinusoidal Tile Grid 分幅方式，共 40 景，每景覆盖范围约为 10°×10°，正弦投影 (Sinusoidal)。每景 2013 年每天的蒸散发数据存放于一个单独文件夹，最后被压缩为 36 个文件
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2012AA12A304, 2012AA12A305, 2013AA12A301）
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101, 中国科学院地理科学与资源研究所

续表

条 目	描 述
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、实体数据（中英文）和通过《全球变化数据学报》（中英文）发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10%引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[2]

3 数据研发方法

地表实际蒸散发（区别于潜在蒸散发或参考蒸散发）的地面观测计算方法中具有代表性的是蒸渗仪、波文比能量平衡观测系统、涡动相关仪和大孔径闪烁仪等，各具不同的时空尺度和优势。相对于传统的水文气象学方法，遥感技术具有空间上连续和时间上动态变化的特点，遥感数据的多光谱信息能够提供与地表能量平衡过程及地表覆盖状况密切相关的参数。因此，利用遥感技术进行区域尺度非均匀下垫面地表实际蒸散发的估算，已成为遥感应用领域的重要方向^[3,4]。

3.1 算法原理

针对中国-东盟自然地理环境复杂多样的特点，研发了基于多参数化方案的适用于不同土地覆盖类型的地表蒸散发估算模型 ETMonitor^[5]，利用多源遥感数据反演的地表参数和气象数据作为驱动，以主控地表能量和水分交换过程的能量平衡、水分平衡及植物生理过程的机理为基础，所计算的地表蒸散发包括：土壤蒸发、植被蒸腾、冠层降水截留蒸发、水面蒸发和冰雪升华。

对于土壤蒸发和植被蒸腾，数据研发过程中所采用的 ETMonitor 模型主要是基于 Shuttleworth-Wallace 双源模型及一系列阻抗参数化方案来建立的^[6-9]。Shuttleworth 和 Wallace 在 Penman-Monteith 公式的基础上，引入冠层表面阻抗和土壤表面阻抗参数，建立了由植被冠层和冠层下的土壤两部分组成的双源蒸散发模型^[6]。模型中的阻抗参数包括空气动力学阻抗、土壤表面阻抗和冠层表面阻抗，其中土壤表面阻抗和冠层表面阻抗是 ETMonitor 模型的核心内容。土壤表面阻抗的参数化方法考虑了土壤的水力学属性及微波遥感反演的土壤水分数据，而冠层表面阻抗的参数化方法考虑了植物叶面气孔开闭对于外界环境中的太阳辐射、气温、饱和水汽压差及根系层土壤含水量的响应。

大气降水落到植被下的土壤表面之前，受到植被冠层茎、叶的截留和吸附作用。在降水期间和降水后，植被对降水的截留和随后的蒸发是陆地生态系统水分平衡的重要组成部分，对于森林生态系统来说尤为重要，特别是当降水不集中时，这部分水量是相当可观的。对于植被冠层的降水截留蒸发，数据研发过程中所采用的 RS-Gash 模型^[10,11]是对经典的站点尺度 Gash 降水截留模型的改进^[12]，可用于计算区域尺度非均匀植被的降水截留蒸发。

水面蒸发是一种供水始终充分的蒸发，冰雪升华是水面蒸发的一种特殊情况，当冰雪

上空的水汽压小于当时温度下的饱和水汽压时，冰雪升华就会发生。数据研发过程中采用 Penman 公式计算水体表面蒸发，采用 Kuzmin 公式计算冰雪升华。

3.2 技术路线

地表蒸散发遥感数据产品研发流程如图 1 所示。针对不同的下垫面类型，ETMonitor 模型计算的地表蒸散发包括：（1）对于水体下垫面，计算水面蒸发；（2）对于冰雪下垫面，计算冰雪升华；（3）对于植被与土壤组成的混合下垫面，计算冠层降水截留蒸发、土壤蒸发和植被蒸腾。

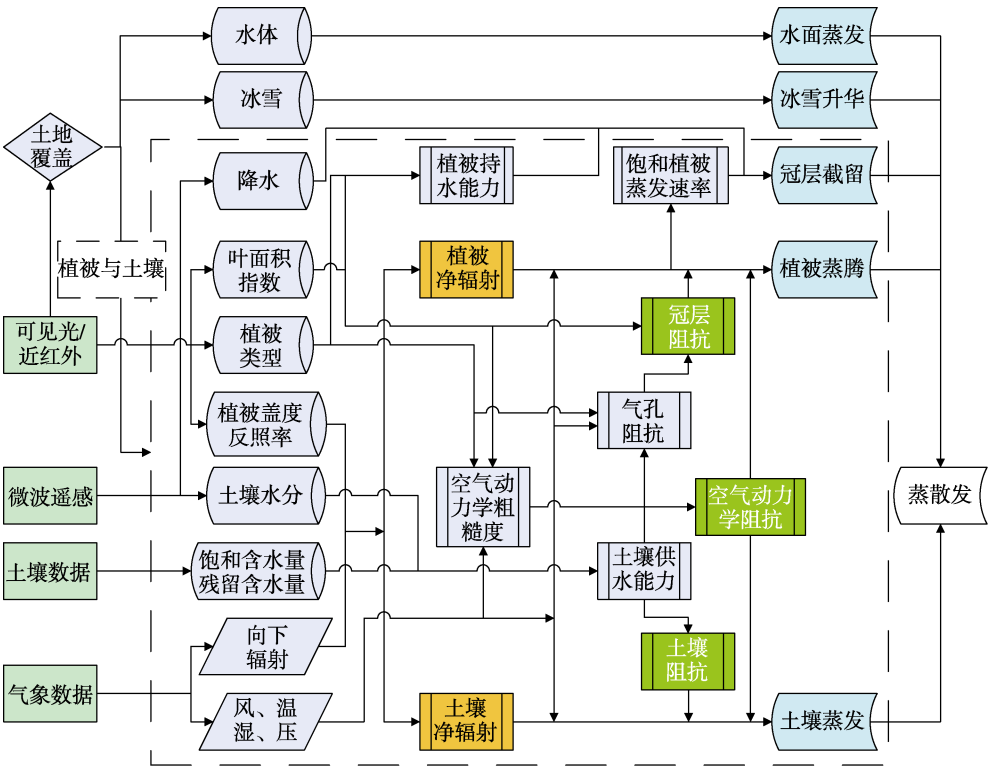


图 1 多源遥感数据驱动的地表蒸散发数据研发流程图

数据研发过程中 ETMonitor 模型的主要输入数据包括两类：（1）多源遥感数据是由国家高技术研究发展计划“星机地综合定量遥感系统与应用示范”项目提供的覆盖中国-东盟区域的植被指数^[13]、反照率、土壤水分、土地覆盖类型等；（2）大气驱动数据是由欧洲中期天气预报中心 ECMWF 发布的 ERA-Interim 全球大气再分析数据，包括近地面气温、露点温度、气压、风速、向下短波辐射、向下长波辐射、降水等 7 个参数。

4 数据结果与验证

4.1 数据结果组成及其空间分布

中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集(2013)采用 Sinusoidal Tile Grid 分幅方式^[14]，共 40 景 (Tile)，每景覆盖的经纬度范围约为 10°×10°，正弦投影 (Sinusoidal)，时空分辨

率为 1 km/1 d。每景全年的数据量约为 1 GB，总数据量共 40 GB。数据类型为整型，除以 1,000 即为实际日蒸散发 (mm/d)。每景 2013 年每天的蒸散发数据置于一个单独文件夹，最后被压缩为 36 个文件。

基于多源遥感数据估算的 2013 年中国-东盟区域地表蒸散发空间分布如图 2 所示。根据布德科 (Budyko) 水热耦合平衡假设，陆面长期平均蒸散发主要由大气对陆面的水分供给 (降水) 与蒸发能力 (净辐射或潜在蒸散发) 之间的平衡决定，因而中国-东盟区域地表蒸散发的空间分布格局主要由不同气候条件下的区域水分条件 (降水、土壤水) 和热量条件 (太阳辐射、气温) 共同决定，具有明显的地带性特征。位于马来群岛的文莱、马来西亚、印度尼西亚和菲律宾蒸散发达到 1,000 mm 以上；位于中南半岛的柬埔寨、老挝、越南、泰国西部、缅甸北部和南部以及中国华中、华南地区蒸散发为 800–1,000 mm；缅甸中东部、泰国东部，以及中国东北、华北、华中和西南地区蒸散发为 400–800 mm；中国西北和青藏高原大部分寒区旱区蒸散发小于 400 mm，其中西北干旱荒漠地区蒸散发不足 100 mm。

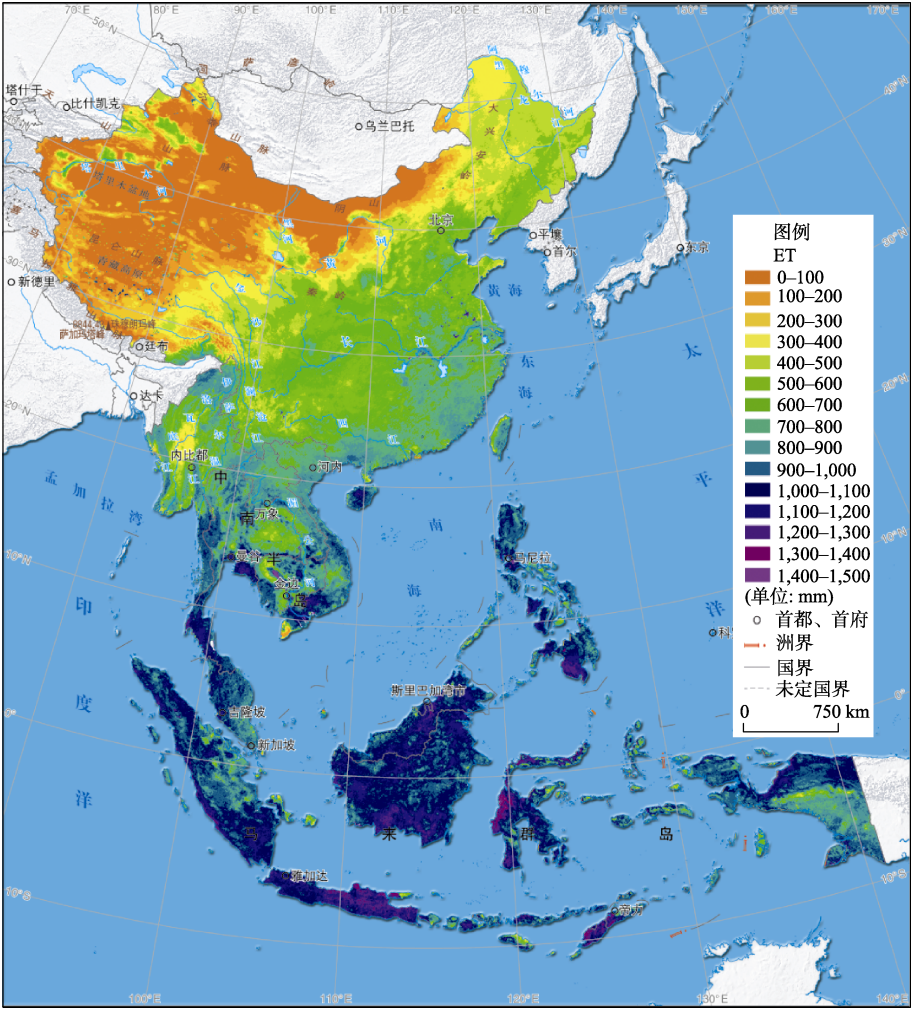


图 2 2013 年中国-东盟区域蒸散发空间分布 (审图号: GS(2015)1527 号)

中国西北干旱半干旱地区地处亚欧大陆腹地，作为亚洲中部山系发育最为典型的地区之一，以山、盆相间地貌格局为特点，河流均发源于山区（如塔里木河、黑河、石羊河等），主要由山区冰雪融水和降水补给。通过人类活动对水资源的开发和利用，依靠河流及地下水灌溉发育形成斑块状散布于温带荒漠中的灌溉绿洲景观。这些地区在植被生长季节（5-9 月）水热资源充足，有利于植物光合作用和蒸腾作用的进行，蒸散发达到 500 mm 以上，与周围广阔的荒漠戈壁截然不同，呈现出独特的非地带性特征。

4.2 数据结果验证

遥感估算地表蒸散发已成为获取区域尺度非均匀下垫面地表实际蒸散发的一个有效途径，但该技术还存在一定的局限性。为了保证地表蒸散发遥感数据产品的准确性，利用蒸渗仪、涡动相关仪可以直接对遥感估算地表蒸散发进行验证。对于中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集（2013），选择怀来站（农田）^[15]称重式蒸渗仪观测数据，以及阿柔站（草地）^[16,17]、玛曲站（草地）^[18]、花寨子站（荒漠）^[16,17]、林芝站（草地）^[19]涡动相关仪观测数据对其进行真实性检验。此外，站点验证同时采用 MOD16 ET 遥感数据产品^[20]进行对比验证，以评估本数据集的相对可靠性。

采用直接检验的方法对地表蒸散发遥感数据产品进行精度评价，在利用涡动相关仪、蒸渗仪的观测数据（“相对真值”）对 1 km 分辨率的遥感估算蒸散发进行验证过程中，直接选取地面观测仪器所在位置像元作为验证像元^[21]。在对遥感估算蒸散发进行精度评价时，主要通过相关系数 R （Correlation Coefficient）或决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE（Root Mean Square Error）等统计量作为精度检验的判据。其中， R 或 R^2 反映遥感估算蒸散发与观测值时间序列变化趋势的一致性，RMSE（mm/d）反映遥感估算蒸散发相对于观测值的偏离程度。

通过 2013 年中国-东盟区域地表蒸散发数据集与涡动相关仪、蒸渗仪之间的对比分析表明，本数据集与地面观测之间具有较为一致的时间序列变化特征，能够较好的反映实际地表蒸散发的时空动态变化。与 MOD16 相比，本数据集与地面观测值更为接近，具有更大的决定系数 R^2 和更小的均方根误差 RMSE（表 2）。

表 2 2013 年中国-东盟区域 ETMonitor 估算 ET 精度评价及其与 MOD16 的对比

涡动相关及蒸渗仪观测站点	R^2		RMSE (mm/d)	
	ETMonitor	MOD16	ETMonitor	MOD16
怀来（农田）	0.84	0.79	0.72	1.31
阿柔（草地）	0.92	0.70	0.89	1.09
玛曲（草地）	0.94	0.74	0.34	0.56
花寨子（荒漠）	0.74	0.10	0.64	1.12
林芝（草地）	0.89	0.79	0.47	0.57

5 讨论和总结

遥感估算地表蒸散发模型需要近地面大气状态数据，包括气温、气压、空气湿度（相对湿度、比湿、露点温度等）、风速、向下短波辐射、向下长波辐射、降水等作为模型的驱

动数据。大气再分析资料是利用数据同化系统把各种类型与来源的气象观测资料与短期数值天气预报产品进行融合,生成长期而连续的具有更高时空分辨率的大气驱动数据产品。目前国际上主要的全球大气再分析资料包括:NCEP/NCAR、MERRA、GLDAS、ERA-Interim等。Decker等利用全球通量网(Fluxnet)观测数据对国际上主要的大气再分析资料的近地面气象数据进行评价和验证,结果表明 ERA-Interim 具有相对较高的数据精度^[22]。需要指出的是,中国-东盟地形地貌复杂,由于地形起伏导致气象条件空间异质性明显。全球大气再分析资料的空间分辨率较粗,无法精细刻画复杂地形条件下近地面气象参数的时空分异特征,因此需要利用中尺度气候模型来对大气驱动数据进行动力降尺度^[23],或者通过考虑地形高程、坡向和坡度的影响来进行统计降尺度。

目前微波遥感反演土壤水分产品(AMSR-E、AMSR2、ASCAT、SMOS、SMAP、FY-3 MWRI等)空间分辨率均为数十千米,随着新型传感器技术的发展以及土壤水分反演方法和降尺度方法的改进,土壤水分产品的精度和空间分辨率都将会有较大的提高^[24]。此外,多种土壤水分产品在不同的条件下具有互补性,通过发展和改进数据融合方法来降低单个遥感数据产品误差,实现多种土壤水分遥感数据产品相互融合优势互补。上述相关技术的进步将有效促进地表蒸散发模型的发展和改进,进而生产出更高精度的地表蒸散发产品,并增强降水、土壤水分、蒸散发等水循环变量遥感数据产品之间的一致性,促进降水、土壤水分、地表蒸散发等遥感数据产品在水循环研究和水资源管理中的协同应用。

作者分工: 贾立和柳钦火对数据集的开发做了总体设计;周杰和李占胜采集和处理了多源遥感反演地表参数和大气驱动数据;贾立设计了模型和算法;胡光成生产了数据集;郑超磊和王昆做了数据验证;贾立和胡光成撰写了数据论文。

参考文献

- [1] 贾立,胡光成,郑超磊等.中国-东盟 1 km 分辨率地表蒸散发数据集(2013)[DB/OL].全球变化科学研究数据出版系统,2015. DOI: 10.3974/geodb.2015.01.11.V1.
- [2] 全球变化科学研究数据出版系统.全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy.2014.05 (2017 年更新).
- [3] Kalma, J. D., McVicar, T. R., McCabe, M. F. Estimating land surface evaporation: a review of methods using remotely sensed surface temperature data [J]. *Surveys in Geophysics*, 2008, 29(4/5): 421–469.
- [4] Li, Z. L., Tang, R. L., Wan, Z., *et al.* A review of current methodologies for regional evapotranspiration estimation from remotely sensed data [J]. *Sensors*, 2009, 9(5): 3801–3853.
- [5] Hu, G. C., Jia, L. Monitoring of evapotranspiration in a semi-arid inland river basin by combining microwave and optical remote sensing observations [J]. *Remote Sensing*, 2015, 7(3): 3056–3087.
- [6] Shuttleworth, W. J., Wallace, J. S. Evaporation from sparse crops—an energy combination theory [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1985, 111(469): 839–855.
- [7] Bastiaanssen, W. G. M., Cheema, M. J. M., Immerzeel, W. W., *et al.* Surface energy balance and actual evapotranspiration of the transboundary Indus Basin estimated from satellite measurements and the ETLook model [J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: W11512.
- [8] Jarvis, P. G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B—Biological Sciences*, 1976, 273(927): 593–610.

- [9] Stewart, J. B. Modelling surface conductance of pine forest [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1988, 43(1): 19–35.
- [10] Cui, Y. K., Jia, L. A modified Gash model for estimating rainfall interception loss of forest using remote sensing observations at regional scale [J]. *Water*, 2014, 6(4): 993–1012.
- [11] Cui, Y. K., Jia, L., Hu, G. C., *et al.* Mapping of interception loss of vegetation in the Heihe River basin of China using remote sensing observations [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(1): 23–27.
- [12] Gash, J. H. C., Lloyd, C. R., Lachaud, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model [J]. *Journal of Hydrology*, 1995, 170(1/4): 79–86.
- [13] 李静, 曾也鲁, 柳钦火等. 中国-东盟 1 km 分辨率 NDVI 数据集(2013)[DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2015. DOI: 10.3974/geodb.2015.01.16.V1.
- [14] MODIS Grids, Sinusoidal Tile Grid. http://modis-land.gsfc.nasa.gov/MODLAND_grid.html.
- [15] Liu, S. M., Xu, Z. W., Zhu, Z. L., *et al.* Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487(9): 24–38.
- [16] Liu, S. M., Xu, Z. W., Wang, W. Z., *et al.* A comparison of eddy-covariance and large aperture scintillometer measurements with respect to the energy balance closure problem [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2011, 15(4): 1291–1306.
- [17] Li, X., Cheng, G. D., Liu, S. M., *et al.* Heihe Watershed Allied Telemetry Experimental Research (Hi-WATER): Scientific objectives and experimental design [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(8): 1145–1160.
- [18] Wang, S. Y., Zhang, Y., Lv, S. H., *et al.* Estimation of turbulent fluxes using the flux-variance method over an alpine meadow surface in the eastern Tibetan Plateau [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, 30(2): 411–424.
- [19] Ma, Y. M., Kang, S. C., Zhu, L. P., *et al.* Tibetan Observation and Research Platform: atmosphere-land interaction over a heterogeneous landscape [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1487–1492.
- [20] Mu, Q. Z., Zhao, M. S., Running, S. W. Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(8): 1781–1800.
- [21] Jia, Z. Z., Liu, S. M., Xu, Z. W., *et al.* Validation of remotely sensed evapotranspiration over the Hai River Basin, China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117: D13113.
- [22] Decker, M., Brunke, M. A., Wang, Z., *et al.* Evaluation of the reanalysis products from GSFC, NCEP, and ECMWF using flux tower observations [J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(6): 1916–1944.
- [23] Pan, X. D., Li, X., Shi, X. K., *et al.* Dynamic downscaling of near-surface air temperature at the basin scale using WRF—a case study in the Heihe River Basin, China [J]. *Frontiers of Earth Science*, 2012, 6(3): 314–323.
- [24] Shi, J. C., Du, Y., Du, J. Y., *et al.* Progresses on microwave remote sensing of land surface parameters [J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(7): 1052–1078.