文章编号:1672-3317(2018)08-0121-08

基于MOD16的澴河流域蒸散发时空分布特征

张 特^{1,2},刘 冀^{1,2*},董晓华^{1,2},王海军³,孙周亮^{1,2},谈 新⁴,程 雄^{1,2} (1.三峡大学 水利与环境学院,湖北 宜昌 443002; 2.水资源安全保障湖北省协同创新中心,武汉 430072; 3.水利部 水土保持监测中心,北京 100055; 4.湖北省孝感市水文与水资源勘测局,湖北 孝感 432000)

摘要:【目的】研究流域尺度上的蒸散发分布规律,为流域水资源评价和农业生产提供依据。【方法】基于2000-2013年的MOD16蒸散发数据集,选取澴河花园站以上流域为研究区,对年际、年内以及不同土地利用类型下的流域实际蒸散发(ET)和潜在蒸散发(PET)进行了研究。【结果】针对本流域ET与PET计算,MOD16数据集的精度总体上符合要求,可用于蒸散发研究;2000-2013年,研究区多年平均ET为635mm,总体上呈北高南低、东高西低的趋势。多年平均PET为1536mm,总体上北部丘陵地区最低,山区最高,其他区域分布较为均衡;ET呈逐年下降趋势,年际变化率5.53mm/a,显著下降区域分布在平原地区。PET呈上升趋势,年际变化率16.13mm/a,显著上升区域集中于丘陵地区;以ET和PET差值D反映流域的干旱程度,流域干旱情况呈现上升趋势,在3-6月和9-10月更易出现干旱现象,易旱区域主要为平原地区;不同土地利用类型下的ET在3-11月表现出差异性,从大到小依次为林地>草地>农田>城镇。PET从大到小依次为城镇>农田>草地>林地,林地PET峰值出现在6月,其他均出现在5月。【结论】由于气候条件和人类活动的影响,2000-2013年,澴河流域内ET有所下降,而PET有所上升,平原地区缺水情况最为明显。

关键 词:還河流域; MOD16; 实际蒸散发; 潜在蒸散发; 时空分布
中图分类号: P426.2
文献标志码: A
doi: 10.13522/j.cnki.ggps.20180078

张特,刘冀,董晓华,等.基于MOD16的澴河流域蒸散发时空分布特征[J].灌溉排水学报,2018,37(8)121-128.

0 引 言

蒸散发和降雨是全球水循环的纵向出入方式,全球内约有60%的降水通过蒸散发的形式扩散到大气中^[1]。蒸散发包括土壤蒸发和植被蒸腾,是流域水量平衡和地表能量平衡中的重要环节^[2]。描述流域蒸散发的指标包括参与水循环的实际蒸散量(Actual Evapotranspiration,简称*ET*)和充分供水条件下的潜在蒸散发量(Potential Evapotranspiration,简称*PET*)^[3]。由于气象因素和下垫面情况的差异,流域内蒸散发的时空分 布呈现不均匀性,而*ET*和*PET*的差值可以在一定程度上反映流域的干旱缺水程度。

随着大量的气象站的建立,降水的时空分布规律已经能大致掌握,对蒸散发时空分布规律的描述存 在较大困难^[4]。传统蒸发观测站只能反映站点周围的蒸散发情况,并且站点较少且空间分布不均匀,不足以 应用到全流域^[5]。随着遥感技术的发展,流域蒸散发观测已经实现了由"点"到"面"的重大突破,遥感技术对 揭示流域尺度蒸散发非均匀分布的提供了有效的技术手段^[6]。国内外已有学者利用遥感数据进行了流域蒸 散发研究,其中具代表性的基于地表能量平衡的SEBAL模型^[7]和SEBS模型^[8]。杨永明等^[9]利用SEBS模型 在黑河流域反演了日蒸散量,与参考作物蒸发量相比较,反演精度比较理想;魏强等^[10]使用SEBAL模型反演 晋中市日蒸发量,通过站点参考作物蒸发量验证,反演结果合理;周峰等^[11]采用植被指数一地表温度特征空 间法估算了伊河流域的蒸散发,结果与地表干湿状况一致。由于遥感数据在时间上存在不连续性,这些研 究多为短时间尺度下的蒸散发,在年际尺度下的蒸散发时空格局研究上仍有所欠缺。2013年NASA团队发 布了全球陆地蒸散发产品(MOD16),该产品提供了地表蒸散量的特征参数,在全球流域尺度的反演精度达

作者简介:张特(1996-),男,湖北宜昌人。硕士研究生,主要从事流域水文模拟方面的研究。E-mail: 961740186@qq.com

通信作者:刘冀(1980-), 男,河北保定人。副教授,博士,主要从事流域水文模拟与防洪调度研究。E-mail: liuji@ctgu.edu.cn

收稿日期:2018-01-30

基金项目:国家自然科学基金项目(51609124);国家留学基金委项目(201708420137)

到了86%^[12-13]。该数据集可以免费获取且时间分辨率较高,在研究流域蒸散发的时空分布上有突出优势,国内已经应用该数据集对全国^[14]、陕西省^[15]、北洛河流域^[16]等进行了研究。

澴河流域位于鄂东北地区,该地区地表水资源多为客水,地下水资源较少,年内降水在时空上分配不均,容易发生季节性干旱^[17]。因此,揭示澴河流域蒸散发的时空分布规律,对水资源评价和农业生产有重大意义。基于 MOD16 产品研究澴河流域年际、年内和不同土地利用类型下 ET 和 PET 的时空分布特征,旨在为水资源评价和农业生产提供一定科学依据。

1 数据与方法

1.1 流域概况

澴河流域位于鄂东北部,跨淮河、长江二大流域。选取澴河流域花园站以上区域(31°15′—31°55′N, 113°40′—114°20′E)为研究区,流域面积2 601 km²。流域总体地势特征为北高南低,以平原区为主,约占流域 总面积的80%。区域气候属于亚热带季风气候,多年平均降雨量1 150 mm左右,年平均气温16.2 ℃,雨量充 沛且温度适宜。主要农作物为水稻和小麦,林区以混交林为主,包括松、杉和经济林等。流域内主要雨量 站、气象站和水系分布见图1,土地利用情况见图2。



图1 花园以上流域站点、水系分布

图2 流域土地利用情况

1.2 数据来源

MOD16遥感数据由Mu等¹¹²提出的基于彭曼公式改进的蒸散算法计算,包括土壤表层蒸发、植被冠层的 截留水分蒸发和植被蒸腾3个部分。该数据集包含了全球有植被覆盖区域(不包含水域、裸地)的8d、月和 年3种时间尺度下的实际蒸发(ET)、潜在蒸发(PET)、潜热通量(LE)和潜在潜热通量(PLE)4种数据。采用 MOD16产品2000-2013年ET和PET月数据。数据处理流程为:首先对原始MOD16数据采用NASA提供 的MRT工具转换成GeoTiff格式,然后进行重采样、投影转换等操作,最后借助ARCGIS剔除无效值(图中空 白区域)、裁剪和时间尺度转换。选取2007年的MOD12土地利用数据为代表进行研究,各项数据来源及说 明见表1。

		表] 数据米源及用途			
数据名称	数据说明 数据用途 数据来源		数据来源		
MOD16	时间分辨率:月;空间分辨率:1 km	获取流域蒸散发	files.ntsg.umt.edu/data/NTSG_Products/MOD16/		
MOD12	时间:2007年;空间分辨率:500 m	获取流域土地利用情况	https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOTA/MCD12Q1.051/		
气象数据	日尺度气象数据	MOD16精度检验	中国气象数据网		
水文数据	花园站实测径流、蒸发数据	MOD16精度检验	水文站实测		
	流域降雨量		雨量站实测		

1.3 研究方法

采用气象资料(日照时间、日平均气温、日最高气温、日最低气温、相对湿度、日平均风速)和世界粮农组织(FAO)修正的Penman-Montieth公式推求大悟站日参考作物蒸散量,然后通过新安江模型进行日径流模拟,提取模型计算的日实际蒸散发。再进一步计算流域年平均参考蒸散量和年平均实际蒸散发量,用于检验MOD16精度,最后采用线性趋势法分析澴河流域蒸散发变化情况。

1)MOD16精度检验方法

为了检验MOD16数据在澴河流域的适用性,首先使用FAO修正的Penman-Monteith公式计算大悟站的 参考作物蒸散量与站点所在像元的潜在蒸散发量进行对比。虽然此公式中假定的地表植被覆盖情况与流 域实际情况有所出入,但在一定程度上可以作为验证潜在蒸散发的依据,国内已有一些学者利用此公式进 行潜在蒸散发的研究^[18-19]。采用三层蒸散发计算模式的新安江模型进行日径流模拟,模型中的实测降雨和 实测蒸发均使用花园水文站观测资料,使用SCE-UA算法率定,率定期为1983-2013年,日径流模拟决定系 数0.88,模拟精度较好,根据模型计算的流域实际蒸散发与MOD16实际蒸散发进行对比。采用平均相对误 差(*MRE*)和均方根误差(*RMSE*)作为MOD16数据精度评价指标。

2)蒸散发年际变化分析方法

采用最小二乘法进行线性趋势分析,计算2000-2013年MOD16影像上每个像元蒸散发量变化趋势。 并采用*t*检验法进行变化趋势显著性检验。具体计算式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{n} i \cdot ET_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} i \sum_{i=1}^{n} ET_i}{\sum_{i=1}^{n} i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^{n} ET_i)^2} , \qquad (1)$$

式中:K为变化率;n为样本个数(n=14);ET;是第i年的蒸散发量;SE(K)是K的标准差。当K>0时,该像元蒸散发为增加趋势;K<0时,该像元蒸散发为减少趋势;当 | K/SE(K) | ≥toos时(toos=1.96),认为该区域蒸散发变化趋势是相对显著的。将式(1)中的ET更换为PET,同理可进行蒸散发能力的年际变化分析。

2 结果与分析

2.1 MOD16数据精度检验

对MOD16数据精度进行验证,ET均方根误差RMSE为60.6 mm/a,平均相对误差MRE为7.5%;PET均 方根误差RMSE为246 mm/a,平均相对误差MRE为17.5%。各年的计算结果如表2所示。由表2可知, MOD16的ET数据在大多数年份比新安江模型模拟的ET偏小,而PET在整个研究时段内均比参考蒸散发 量大,这种误差可能是由于图像分辨率和算法局限性等因素引起的。总体上,ET和PET的平均相对误差均 低于20%,因此MOD16数据可用于澴河流域的蒸散发研究。

年份 —	ET			PET			
	模型模拟值/mm	MOD16/mm	相对误差/%	P-M/mm	MOD16/mm	相对误差/%	
2000	672	643	4.27	1 261	1 487	17.9	
2001	579	576	0.45	1 409	1 519	7.8	
2002	696	719	3.32	1 245	1 398	12.3	
2003	647	740	14.45	1 159	1 315	13.5	
2004	710	664	6.54	1 321	1 505	13.9	
2005	677	669	1.24	1 478	1 484	0.4	
2006	705	640	9.25	1 268	1 547	22	
2007	714	623	12.72	1 282	1 639	27.8	
2008	680	646	5.03	1 219	1 533	25.7	
2009	676	608	10.03	1 245	1 603	28.7	
2010	721	641	11.11	1 416	1 569	10.8	
2011	629	539	14.37	1 310	1 642	25.4	
2012	621	615	0.99	1 342	1 591	18.5	
2013	700	621	11.27	1 345	1 629	21.2	

表2 MOD16精度检验结果

2.2 年 ET 和 PET 时空变化特征

澴河流域年平均ET和PET在时间上的分布如图3所示。由图3可知,2000-2013年澴河流域多年平均

ET约为635 mm,波动范围为539~740 mm,在2003年达到峰值,2011年为最小值,整体呈下降趋势,平均下降速率为5.53 mm/a。年平均PET约为1536 mm,变化范围在1315~1642 mm之间,分别在2011年和2003年达到最大值和最小值,整体呈上升趋势,平均上升速率为16.13 mm/a。定义PET和ET的差值为流域干旱程度D。D的变化范围为575~1103 mm,平均上升速率为21.67 mm/a,分别在2003年和2011年达到最小值和最大值。根据流域内雨量站资料显示,2003年降水高达到1365 mm,而2011年降水仅有632 mm,这说明D可以较好地反映流域干旱情况。



图3 年平均ET和PET

多年平均*ET*和*PET*的空间分布见图4。由图4可知,不同像元的多年平均*ET*分布在473~1055 mm之间,流域内*ET*空间分布差异显著,北部、东南部及东北部的丘陵和山区*ET*较高,而平原地区*ET*相对较低。不同地区多年平均*PET*在1380~1750 mm之间,北部及东南部山区*PET*最高,而平原地区的*PET*分布差异不大,但高于丘陵地区。其原因为:相较于平原地区多为农作物和草地的植被特点而言,丘陵地区植被覆盖度更高且冠层高大,其空气动力学阻抗更小,在水汽传输上更有优势,并且在截留能力上强于低矮植被,冠层表面蒸发量更多。而平原地区水分供应条件受限,且湿润程度低于丘陵地区,故实际蒸发更少。由于流域内的太阳辐射相差不大,平原地区实际蒸发所消耗能量相对较少,更多的能量以感热的形式引起大气边界层暖干程度增加,使*PET*高于丘陵地区。北部海拔500m以上的山区植被茂盛,持水能力强,*ET*和*PET*不受制于地表湿润程度,而取决于大气条件的变化,二者的分布表现出较好的一致性。



图4 多年平均ET和PET空间分布

图 5 为澴河流域年际 ET 和 PET 变化趋势图。由图 5 可知,流域内的年平均 ET 减小,而年平均 PET 增加。ET 显著减少的区域约占全流域的 37%,主要在平原地区和城镇附近。流域内 PET 显著增加的区域约占 8%,主要集中在低海拔丘陵地带。蒸散发的变化受气候条件和人类活动共同作用的影响,相应气象数据和 土地利用数据表明,近些年来流域内降雨呈显著减小趋势,2007—2013 年流域内的林地和草地面积分别减 少了 7.8%和 2.5%,而农用地面积相应增加了 10.3%。平原地区 ET 呈现显著下降趋势,可能是由于近年来城镇扩张、开垦草地和降雨减少综合作用的结果,而低海拔丘陵区 PET 显著上升,则可能是对这些区域的毁林 开荒所导致的。



2.3 月ET和PET时空变化特征

各月平均*ET*和*PET*见图6。由图6可知,*ET*和*PET*年内分布差异显著,总体上均呈单峰型分布。*ET*在 1—4月和10—12月变化较小,从4月起开始明显增加,在7月达到峰值116.6 mm,之后开始下降,在12月达 到最低值21.8 mm。而*PET*在1—2月、11—12月(冬季)变化较小,1月为最低值65.8 mm,从3月开始显著增 加,于5月达到峰值183.1 mm,然后开始减小。*PET*和*ET*的月平均差值*D*为75.1 mm,在3—6月、10—11月 均高于平均值,于5月达到最大123.2 mm,表明在这2个时间段内流域内更易出现干旱缺水情况。这与澴河 流域所处的鄂东北地区易发生春旱、初夏旱和秋旱的规律一致,在这些时间段内,灌溉用水更容易以蒸发的 形式流失。





ET和PET在不同季节的空间分布规律如图7所示。从图7可以看出,在春季和秋季,ET与PET空间分

布差异较大,流域北部及东南部ET高于其他地区,PET的分布则恰好相反,夏季和冬季ET与PET的空间分 布则比较一致。差异原因为流域北部、东南部为海拔相对较高的山区林地,而其他地区多为丘陵平原。随 着植被返青,春季林区ET逐渐上升,相较平原地区而言,转化为感热通量的能量更少,林区PET更少;夏季 温度较高且降雨充沛,流域蓄水量较为充足,植被的蒸腾作用和土壤蒸发更加明显,ET和PET分布规律较为 一致;秋季农作物成熟,多为晴好天气,林地蒸腾作用强,且平原地区蓄水量相对林区较少,ET和PET分布存 在差异;冬季受低温影响,土壤蒸发量较小,植物的蒸腾作用也达到最小,ET和PET分布一致。

2.4 不同土地利用类型的蒸发特征

流域内不同土地利用类型影响着水循环过程,为了进一步量化土地利用对蒸散发的影响,将澴河流域 分为林地、草地、农田、城镇4种土地利用类型,所占流域面积比例分别为20%、17%、62%和1%。多年平均 ET从大到小依次为林地(699 mm)>草地(581 mm)>农田(567 mm)>城镇(539 mm),林地的ET超出其他3种 土地利用类型100 mm以上。而不同土地利用类型下的多年平均PET差异并不明显,从大到小依次为城镇 (1598 mm)>农田(1581 mm)>草地(1577 mm)>林地(1540 mm),最大差异仅有58 mm。

不同土地利用类型下的月平均ET分布如图8所示。由图8可知,各种土地利用类型的平均ET从大到小 分布与多年平均ET一致,但分布特点也不尽然相同。在11月至次年3月,城镇ET和其他土地利用类型ET 比较接近,进入植物生长期后,有植被覆盖区域ET增加明显,林地ET的增长速率表现得尤为明显。图9为 不同土地利用类型下的月平均PET分布。由图9可知,各种土地覆盖类型的月平均PET大小十分接近,但峰 现时间有所差异,林地在6月达到峰值,而草地、城镇、农田在5月达到峰值。



3 讨论

研究表明流域内高植被覆盖区 ET 较大,这与范建忠等¹⁵³在陕西省的研究结果一致。高植被覆盖区蒸腾 作用强,冠层截留雨量更多,并且腐殖质丰富,微生物群落活跃度高而土质疏松,对下渗过程有促进作用,使 土壤含水量更高,这些因素都会引起 ET 较大。赫晓慧等¹⁵⁷在假定流域年蓄水变化量为0的基础上,采用水 量平衡法对 ET 进行验证,而这种假设在实际应用中带来一定的误差。本研究在新安江模型径流模拟效果 较好的基础上,利用模型计算的 ET 进行验证,在一定程度上减小了不确定性。2000—2013 年澴河流域整体 呈现一定的干旱倾向,在春季、初夏和秋季的地表水分更易以蒸发的形式流失,这些时间段内可为农田提供 一定的灌溉量以确保作物的正常生长。林地 ET 最高,植被对流域水分涵养有促进作用,通过退耕还林、还 草等措施合理调整澴河流域的土地利用结构可以有效地防止流域干旱化。MODIS 数据在监测大面积的流 域蒸散发上有突出优势,文中采用水文模型对其精度进行验证,但模型本身存在一定的不确定性,其可靠性 仍需进一步验证,以后的研究中可引入GRACE 卫星数据进行分析。此外,蒸散发对气候条件的变化比较敏 感,各种气象因素对 ET 和 PET 的定量化影响也有待深入研究。

4 结 论

1)MOD16产品在澴河流域大部分年份计算的年实际蒸散发量比新安江模型计算结果偏小,而年潜在蒸散发量在整个研究时段内均比参考蒸发量大,但总体上满足精度要求,可用于本流域的蒸散发研究。 2000-2013年,澴河流域多年平均ET为635 mm,多年平均PET为1536 mm。二者空间分布差异显著,多年平均ET在流域北部及东南部丘陵地区较高,而PET在这些地方则相对较低,北部山区的ET和PET均为流域内最高。这种差异表明流域内易旱地区主要集中在平原地区,而丘陵地区和山区相对湿润一些。 2)2000—2013年,ET以5.53 mm/a的变化率逐年下降,在平原区域表现得相对显著;PET以16.13 mm/a的变化率逐年上升,在丘陵地区表现的相对显著。ET和PET的差值D以21.67 mm/a的变化率逐年增加,表明澴河流域整体呈现一定程度的干旱倾向。由于辐射、气象因素和下垫面条件的差异,月平均ET和PET分别在7月和5月达到峰值。月平均差值D为75 mm,在3—6月和9—10月均高于75 mm,在5月更是高达123 mm。在空间分布上,冬季和夏季的ET、PET分布情况较为一致,而春季和秋季分布差异较大。

3)针对不同土地利用类型而言,年平均*ET*分布表现为林地>草地>农田>城镇,年平均*PET*的分布表现 为城镇>农田>草地>林地。年内各种土地利用类型的*ET*和*PET*均呈单峰分布,但分布特点有所差异。总体 上*ET*分布差异较大,*PET*差异较小,说明下垫面条件对*ET*的影响更加明显。

参考文献:

- WANG K, DICKINSON R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(RG2005): 1-54.
- [2] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1 295-1 307.
- [3] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 579-588.
- [4] 王介民, 高峰, 刘绍民. 流域尺度 ET 的遥感反演[J]. 遥感技术与应用, 2003(5): 332-338.
- [5] 郭晓寅,程国栋.遥感技术应用于地表面蒸散发的研究进展[J].地球科学进展,2004(1):107-114.
- [6] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008(3): 515-528.
- [7] BASTIAANSSEN W G M, MENENTI M, FEDDES R A, et al. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (sebal): 1. formulation[J]. Journal of Hydrology, 1998(1/4): 198-212.
- [8] SU Z. The surface energy balance system (sebs) for estimation of turbulent heat fluxes[M]. S.I.: Copernicus Gmbh, 1999: 85-100.
- [9] 杨永民, 冯兆东, 周剑. 基于 SEBS 模型的黑河流域蒸散发[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008(5): 1-6.
- [10] 魏强, 张吴平, 吴亚楠. 基于 SEBAL 模型的小麦水分生产率研究[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(7): 38-46.
- [11] 周峰, 王文, 王晓刚. 基于植被指数-地表温度特征空间的伊河流域蒸散发量估算[J]. 地理与地理信息科学, 2013, 29(2): 116-120, 124
- [12] MU Qiaozhen, HEINSCH F A, ZHAO Maosheng, 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.
- [13] MU Q, ZHAO M, RUNNING S W. Improvements to a modis global terrestrial evapotranspiration algorithm[J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115(8): 1 781-1 800.
- [14] 贺添, 邵全琴. 基于 MOD16 产品的我国 2001-2010 年蒸散发时空格局变化分析[J]. 地球信息科学学报, 2014, 16(6): 979-988.
- [15] 范建忠,李登科,高茂盛.基于MOD16的陕西省蒸散量时空分布特征[J].生态环境学报,2014,23(9):1536-1543.
- [16] 赫晓慧, 梁冰洁, 郭恒亮, 等. 基于MOD16的北洛河流域蒸散发空间格局演变研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1): 177-182.
- [17] 敖立万,吴强,匡玉芳,等.湖北省干旱发生规律与对策研究[J].湖北农业科学,2003(1):4-7.
- [18] 郭金路,谷健,扬筑筑.辽西地区潜在蒸散发敏感性分析及变化成因研究[J].灌溉排水学报,2018,37(1):121-128.
- [19] 许婧璟, 靳晓言, 强皓凡, 等. 新疆艾比湖流域潜在蒸散变化特征与成因分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 89-94.

Spatiotemporal Variation of Evapotranspiration in Huan River Basin Using the MOD16 Dataset

ZHANG Te^{1,2}, LIU Ji^{1,2*}, DONG Xiaohua^{1,2}, WANG Haijun³, SUN Zhouliang^{1,2}, TAN Xin⁴, CHENG Xiong^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Environment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resource Security, Wuhan 430072, China;

3.Water and Soil Conservation Monitoring Center, Ministry of Water Resources, Beijing 100055, China;

4. Xiaogan Hydrology and Water Resources Survey Bureau of Hubei Province, Xiaogan 432000, China)

Abstract: [Objective] Evapotranspiration is an important process in hydrological cycle and the aim of this paper is to analyze its spatiotemporal variation in Liao River Basin. [Method] Based on the MOD16 database, we analyzed the annual and monthly evapotranspiration (*ET*) and potential evapotranspiration (*PET*) under different land use from 2000 to 2013 in the upper stream of the Huan River Basin. [Result] The annual *ET* in the studied area was 635 mm, decreasing from north to south and from east to west. The annual average *PET* was 1 536 mm, reaching maximum at northern mountains and minimum at the northern hills, respectively. The average annual *ET* declined at 5.53 mm per annum, but decreased faster in the plain area. While the average annual *PET* rised at 16.13 mm per annum, primarily in the hilly area. The drought degree, defined as the difference between *ET* and

PET, indicated that the basin became increasingly drought, especially in the plain area from March to June and from September to October. Both *ET* and *PET* varied with land use from March to November, with *ET* decreasing in the order grassland<farmland <residence and *PET* changing in the opposite direction. *PET* peaked in May under in all land use, except forest where *PET* peaked in June. [Conclusion] Due to the influence of climate change and anthroponomic activities, *ET* has decreased steadily from 2000 to 2013 in the upper stream of the Huan River Basin, while *PET* has increased in the same period. Water shortage in the plain area is manifest.

Key words: Huan River Basin; MOD16; actual evapotranspiration; potential evapotranspiration; spatiotemporal distribution

责任编辑:陆红飞

(上接第97页)

Changing Water Price to Regulate Groundwater Extraction for Irrigating Winter Wheat in North China Plain

YAN Zongzheng^{1,2}, FANG Qin^{1,2}, LU Yang^{1,2}, LIANG Shuoshuo^{1,2}, ZHANG Xiying^{1*}

(1. Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Hebei Laboratory of Agricultural Water-saving,

Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences,

Shijiazhuang 050021, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: [Objective] Winter wheat-maize rotation consumed a large amount of groundwater and has resulted in groundwater table dropping steadily, threatening sustainable agricultural production in north China Plain. Mitigation strategy has been taken by Hebei Province in attempts to reduce groundwater exploitation by increasing the price of water pumped for irrigation. [Method] We first established the dependence of yield on water consumption and the amount of irrigation based on the long-term irrigation experiment at Luancheng Agro-Experimental Station located at a piedmont of Taihang in Hebei Province. We then developed the relationship between optimal irrigation amount and its economic return under different annual rainfalls, from which we analyzed the optimal water price for different irrigation schedules. [Result] Compared with conventional irrigation, prohibiting groundwater extraction could reduce the winter wheat yield by an average 27%, and 51% in dry years. The threshold water price should be 2.79 yuan/m³ at which irrigation will not bring any economic befits to farmers; thus, on average, farmers should be subsidized 3 678 yuan/hm² to compensate their loss from yield reduction caused by such a prohibition. If the farmers were allowed to pump 100 mm equivalence of groundwater for irrigation annually, the average yield loss is 8.25% and the threshold water price should be 1.34 yuan/m³; on average, therefore, farmers should be subsidized 2 556 yuan/hm² for the lost yield. Similarly, if the groundwater allowance was increased to 200 mm, there would be no significant loss in yield and the threshold water price should be 0.38 yuan/m³; on average, famers should be subsidized 942 yuan/hm². [Conclusion] We should encourage farmers to apply saving-water irrigation using water price added subsidies.

Key words: limited irrigation; water price; grain yield; economic profit; subsidies

责任编辑:白芳芳