

# 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力遥感估算及其时空分布特征

王辉<sup>1</sup>, 刘海隆<sup>1</sup>, 包安明<sup>2</sup>, 郭辉<sup>2</sup>, 赵文字<sup>1</sup>

(1. 石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832003;

2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011)

**摘要:** [目的] 估算 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力(NPP), 并分析其时空分布特征和未来变化趋势, 为自然资源的管理和有效利用提供依据。[方法] 基于 MODIS 植被指数(NDVI)产品数据、气象数据和植被分类数据, 利用改进的 CASA 模型。[结果] 2001—2013 年开孔河流域年均 NPP 呈逐渐增长趋势; 空间上表现为西北高、东南低的特征, 以开孔河为高值中心呈带状分布; NPP 年内变化较大, 夏季最高, 占全年的 65.30%, 冬季仅有 2.13%, 为各季最低; Hurst 指数与 Slope 趋势空间耦合图表明流域内未来 NPP 将呈增长趋势。[结论] 开孔河流域生态环境呈良性发展的态势且季节差异明显、区域差异明显。

**关键词:** 开孔河; NPP; CASA 模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0220-05

中图分类号: S812, TP79

**文献参数:** 王辉, 刘海隆, 包安明, 等. 2001—2013 年开孔河流域净初级生产力遥感估算及其时空分布特征[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 220-224. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.042

## Remotely-sensed Estimation of Net Primary Productivity and Its Spatial-temporal Characteristics in Kaidu-Kongque River Basin from 2001 to 2013

WANG Hui<sup>1</sup>, LIU Hailong<sup>1</sup>, BAO Anming<sup>2</sup>, GUO Hui<sup>2</sup>, ZHAO Wenyu<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi,

Xinjiang Uygur Autonomous Region 832003, China; 2. Xinjiang Institute of Ecology and

Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830011, China)

**Abstract:** [Objective] The paper estimates the net primary productivity(NPP) of the Kaidu-Kongque river basin, and analyzes its spatial and temporal distribution characteristics and the future tendency, in order to provide the basis for the management and effective use of natural resources. [Methods] MODIS vegetation index(NDVI) data, meteorological and vegetation classification data was collected from 2001 to 2013. The improved CASA model was used. [Results] The annual NPP showed a gradually increasing trend, and it was high in northwest but low in southeast. The NPP values showed a zonal distribution with Kiadu-Kongque river as the center(highest NPP value). The annual variation of NPP was great, the highest NPP occurred in summer(65.30%) while the lowest NPP occurred in winter(2.13%). From the Hurst index and slope trend of NPP spatial coupling graph, an increasing trend in NPP could be expected in the future. [Conclusion] The development of ecological environment in the Kaidu-Kongque river basin is sustainable, and the seasonal and regional difference is obvious.

**Keywords:** Kaidu-Kongque river; NPP; CASA model

收稿日期: 2015-12-30

修回日期: 2016-02-01

资助项目: 新疆维吾尔自治区科研创新项目“干旱区内陆河流域融雪性洪水演进及三维可视化研究”(XJGRI2015044); 国家自然科学基金项目“变化环境下内陆河流域水资源承载力与绿洲扩张风险研究”(51569027), “天山中段非均匀下垫面雪水当量被动微波遥感研究”(41371419)

第一作者: 王辉(1991—), 男(汉族), 河北省唐山市乐亭县人, 硕士研究生, 主要研究方向为遥感、生态和水文。E-mail: wanghui@ms.xjb.ac.cn

通讯作者: 刘海隆(1974—), 男(汉族), 四川省德阳市人, 博士研究生, 教授, 主要从事遥感、生态和水文水资源研究。E-mail: liu\_hai\_tiger@163.com。

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)作为生态系统的关键因子<sup>[1]</sup>和陆地碳循环的核心参数<sup>[2]</sup>,对分析全球变化和碳循环过程有着至关重要的意义<sup>[3]</sup>。

从20世纪60年代以来,NPP研究一直是全球变化和陆地生态系统的热点<sup>[1]</sup>。Lieth首次对NPP进行了估算<sup>[4]</sup>;20世纪90年代,学者们开始构建NPP的间接估算模型<sup>[5]</sup>,随后基于遥感数据的光能利用率模型开始蓬勃发展<sup>[6]</sup>,有代表性的是CASA模型<sup>[7]</sup>,并得到广泛应用<sup>[8]</sup>。国内学者也做了大量工作,朴世龙等<sup>[9]</sup>利用CASA模型估算中国NPP,并描述其分布情况;朱文泉等<sup>[10]</sup>结合遥感数据和地理信息系统,构建了一个NPP估算模型;王莺等<sup>[11]</sup>运用CASA模型估算甘南草地NPP,并分析其时空分布特征。结合遥感数据、气候数据的CASA模型,由于估算结果相对准确,得到学者们广泛使用<sup>[12]</sup>。

目前研究在湿润半湿润地区的较多,针对干旱、半干旱区的研究相对较少。本文选取开孔河流域为研究区,结合NDVI数据对NPP进行遥感估算,试图为干旱区植被NPP的估算提供方法和依据,对研究开孔河流域的生态恢复以及陆地生态系统有重要意义。

## 1 研究区概况

开孔河流域位于新疆巴州境内,地处天山南麓、塔里木盆地东北部、塔克拉玛干沙漠东北缘(82°56′—88°12′E,40°48′—43°20′N)。流域由开都河流域和孔雀河流域组成,开都河全长560 km,孔雀河全长420 km,博斯腾湖水域面积980 km<sup>2</sup>,流域绿洲可分为开都河绿洲区、博斯腾湖区和孔雀河绿洲区。研究区属于典型的干旱区大陆性气候,远离海洋,干旱少雨,蒸发强烈,光热资源丰富;流域内分布着非地带性植被,依靠地下水或洪水漫溢生存,主要有胡杨、沙枣、怪柳、骆驼刺等植被,沿河有断断续续的乔、灌、草植被带,山前洪积扇有麻黄、梭梭、白刺等组成的戈壁带,植被稀少;流域内开都河流经焉耆盆地,河滩地分布着草甸沼泽土和草甸土,冲积平原分布着草甸盐土,孔雀河东部为棕漠土,中下部分布着盐化草甸土,距河较远的区域分布着草甸盐土<sup>[13]</sup>。

## 2 数据获取与研究方法

### 2.1 数据获取

2.1.1 气象数据 气象数据采用中国气象数据网(<http://data.cma.gov.cn/>)提供的包括焉耆、若羌、吐鲁番、乌鲁木齐、阿克苏、伊宁、塔城和阿勒泰气象

站点2001—2013年的日降水量、日平均气温、日最低气温、日最高气温、日平均湿度、日照时数、日平均风速和日平均水汽压等。首先,进行精度验证,剔除错误数据,并结合各站点的经纬度信息,然后运用ArcGIS软件对数据进行空间插值,分辨率和投影保持与NDVI数据一致,得到气象数据栅格图像,通过研究区作为掩膜,裁剪气象数据栅格图像。

2.1.2 遥感数据 遥感影像数据采用NASA(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>)提供的2001—2013年MODIS植被指数产品(MODDIS13A1),时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m,首先使用MVC(maximum value composite)算法计算每月数据,然后结合MRT(modis reprojection tool)软件分别对最大值合成的红、近红、短波红外波段进行拼接、重投影及格式转换,最后对影像进行拼接和裁剪。

2.1.3 遥感影像解译与植被分类 植被分类数据采用2010年植被分类数据<sup>[14]</sup>,土地覆盖分类依据国家标准《土地利用现状分类标准》(GBT 21010-2007)中的地类体系,土地覆盖提取所采用的遥感数据为Landsat TM/ETM数据。信息提取在eCognition分类软件中完成。

### 2.2 研究方法

2.2.1 NPP的计算方法 结合ArcGIS中的插值方法和栅格计算器对遥感数据和气象数据进行预处理,运用CASA模型,对NPP进行计算,计算公式如下<sup>[7]</sup>:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中: $NPP(x, t)$ —— $t$ 月份在像元 $x$ 处的净初级生产力; $APAR(x, t)$ —— $t$ 月份在像元 $x$ 处吸收的光合有效辐射; $\epsilon(x, t)$ —— $t$ 月份在像元 $x$ 处的实际光能利用率。

(1) APAR的计算<sup>[7]</sup>。不同的植被会有不同的光合有效辐射吸收比例,计算公式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中: $SOL(x, t)$ —— $t$ 月份在像元 $x$ 处的太阳总辐射量(MJ/m<sup>2</sup>);0.5——植被所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例; $FPAR(x, t)$ ——植被对入射光合有效辐射的吸收比例,2个参数的计算公式如下:

$$SOL = R \times (a + b) \times S$$

$$FPAR(x, t) = \min \left\{ \frac{SR - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95 \right\} \quad (3)$$

式中: $R$ ——天文辐射; $a, b$ ——经验系数; $S$ ——日照百分率; $SR$ ——比值植被指数; $SR_{\min}$ 和 $SR_{\max}$ 分

别对应该植被类型的  $NDVI_{min}$  和  $NDVI_{max}$ ;  $SR(x, t)$  由 MOD13 A1 产品提取归一化植被求得, 计算公式如下:

$$SR(x, t) = \left\{ \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \right\} \quad (4)$$

(2) 光能利用率的估算<sup>[7]</sup>。在现实条件下, 最大光能利用率  $\epsilon_{max}$  会受到温度、水分等气候因子的影响, 所以需要对最大光能利用率进行修正, 得到实际光能利用率, 计算公式如下:

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{max} \quad (5)$$

式中:  $\epsilon(x, t)$ —— $t$  月份在像元  $x$  处植被的实际光能利用率;  $T_{\epsilon_1}, T_{\epsilon_2}$ ——低温和高温对光能利用率产生的胁迫作用;  $W_{\epsilon}$ ——水分的胁迫作用;  $\epsilon_{max}$ ——理想状态下达到的最大光能利用率。

$T_{\epsilon_1}$  和  $T_{\epsilon_2}$  是两种影响的方式不同的温度胁迫系数,  $T_{\epsilon_1}$  是指植被在低温和高温情况下内在的生理结构和生化作用对光能利用率的限制, 计算见公式(6);  $T_{\epsilon_2}$  是指外界环境由最适温度向低温或高温变化时对光能利用率的限制, 计算见公式(7)。

$$T_{\epsilon_1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \quad (6)$$

$$T_{\epsilon_2}(x, t) = \frac{1.184}{\{1 + e^{0.2 \times [T_{opt}(x) - 10 - T(x, t)]}\}} \times \frac{1}{\{1 + e^{0.3 \times [T_{opt}(x) - 10 - T(x, t)]}\}} \quad (7)$$

式中:  $T(x, t)$ ——像元  $x$  在  $t$  月份的平均温度;  $T_{opt}$ ——植物在一年中生长的最适温度, 取一年内 NDVI 值最大时所对应月份的平均气温; 当某一月平均温度  $\leq -10$  °C 时,  $T_{\epsilon_1}(x, t)$  取值为 0; 当某月的平均温度  $T(x, t)$  比最适温度  $T_{opt}(x)$  高 10 °C 或低 13 °C, 该月  $T_{\epsilon_2}(x, t)$  的值等于月平均温度  $T(x, t)$  为最适温度  $T_{opt}(x)$  时  $T_{\epsilon_2}(x, t)$  值的 1/2。

水分胁迫因子  $W_{\epsilon}(x, t)$  反映有效水分条件对光能利用率的影响, 环境中的有效水分越多,  $W_{\epsilon}(x, t)$  越大, 取值范围在 0.5~1, 计算公式如下:

$$W_{\epsilon}(x, t) = 0.5 + \frac{0.5E(x, t)}{E_p(x, t)} \quad (8)$$

式中:  $W_{\epsilon}(x, t)$ ——像元  $x$  在  $t$  月的水分胁迫系数;  $E(x, t)$ ——实际蒸散量, 根据周广胜等<sup>[15]</sup> 构建的实际蒸散模型计算可得;  $E_p(x, t)$ ——潜在蒸散量, 根据 Boucher 提出的互补关系<sup>[16]</sup> 计算可得。

2.2.2 NPP 年际变化趋势分析 本文采用一元线性回归法, 根据单个像元模拟 2001—2013 年开孔河流域植被 NPP 的变化趋势, 计算公式<sup>[17]</sup> 如下:

$$\theta_{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (9)$$

式中:  $\theta_{slope}$ ——趋势斜率;  $n$ ——监测时间段的年数;  $NPP_i$ ——第  $i$  年的植被 NPP。

$$F = U \times \frac{n-2}{Q} \quad (10)$$

式中:  $U$ ——误差平方和;  $Q$ ——回归平方和  $n$ ——年数。根据检验结果将变化趋势分为 5 个等级, 分别为极显著减少 ( $\theta_{slope} < 0, p < 0.01$ ); 显著减少 ( $\theta_{slope} < 0, 0.01 < p < 0.05$ ); 变化不显著 ( $p > 0.05$ ); 显著增加 ( $\theta_{slope} > 0, 0.01 < p < 0.05$ ); 极显著增加 ( $\theta_{slope} > 0, p < 0.01$ )。

2.2.3 NPP 未来变化趋势分析 R/S 分析法, 也称重标极差分析法 (rescaled range analysis), 由 Hurst H. E. <sup>[18]</sup> 最先提出, 经过 Mandelbrot <sup>[19]</sup> 等的努力进一步发展完善。目前, R/S 分析法在水文、地理科学、生态等领域广泛应用<sup>[20-23]</sup>。

R/S 分析法的主要计算过程为: 给定一个时间序列  $\{\xi(t), t = 1, 2, \dots\}$ , 对于任意正整数  $\tau \geq 1$ , 定义均值序列  $\langle \xi \rangle_t = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), t = 1, 2, \dots$ ; 那么极差为:  $R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(x, t) - \min_{1 \leq t \leq \tau}, t = 1, 2, \dots$ ; 则标准差为:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} [\xi(t) - \langle \xi \rangle_t]^2}, t = 1, 2, \dots$$

若存在以下关系  $R/S \propto \tau^H$ , 则说明时间序列存在 Hurst 现象,  $H$  就称为 Hurst 指数。根据不同的 Hurst 指数, 有以下几种情况: 当  $H = 0.5$  时, 即各要素完全独立, 时间序列变化是随机的; 当  $0.5 < H < 1$  时, 即时间序列过程具有持续性, 未来的变化与过去的变化一致; 当  $0 < H < 0.5$  时, 即时间序列过程具有持续性, 但未来的变化与过去的变化相反。

### 3 结果分析

#### 3.1 开孔河流域 NPP 时间变化特征

3.1.1 开孔河流域 NPP 年际变化特征 对开孔河流域近 13 a NPP 年际变化进行分析, 结果如图 1 所示。

图 1 表明, NPP 呈缓慢增长的趋势, 但波动较大。NPP 最小值为 2010 年的 304.14 g/m<sup>2</sup>, 可能是由于 2009—2010 年降水较少, 使得 NPP 大幅降低; NPP 最大值为 2007 年的 359.04 g/m<sup>2</sup>, 主要由于 2007, 2008 年水热条件好, 植物生长情况好。

3.1.2 开孔河流域 NPP 年内变化特征 对开孔河流域近 13 aNPP 年内变化进行分析,结果如图 2 所示。

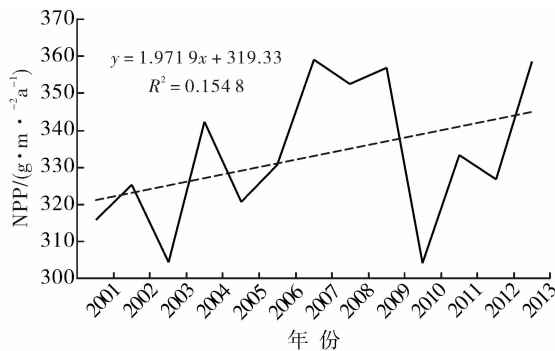


图 1 开孔河流域 NPP 年际变化

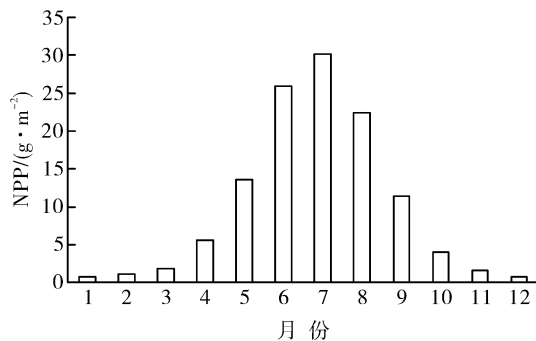


图 2 开孔河流域 NPP 年内变化

图 2 表明,NPP 年内变化特征明显,呈单峰型,从 1 月开始 NPP 值逐渐增大,到 7 月 NPP 值达到最大为  $30.18 \text{ g/m}^2$ ,之后逐渐到 12 月 NPP 值达到最小为  $0.77 \text{ g/m}^2$ ,其中 6—8 月为开孔河流域植被主要生长季。

### 3.2 开孔河流域 NPP 空间变化特征

3.2.1 开孔河流域 NPP 平均值的空间分布 对开孔河流域近 13 aNPP 平均值的空间分布进行分析,结果表明(附图 2),开孔河流域 NPP 分布总体特征为西北高、东南低,以开都河和孔雀河为 NPP 高值中心呈带状分布,向四周扩散衰减。年均单位面积植被 NPP 值为  $0 \sim 100 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的南部、东部和博斯腾湖绿洲外围,这些区域主要为荒漠、戈壁区,植被极度稀少;年均单位面积植被 NPP 值为  $100 \sim 200 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的河流、湖泊绿洲区与荒漠、戈壁区的过渡带,植被覆盖比较稀少;年均单位面积植被 NPP 值为  $200 \sim 300 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的北部、东部山区远离河流的低缓地区和中部山区、平原过渡带,植被以稀疏草地为主;年均单位面积植被 NPP 值为

$300 \sim 400 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的北部低山区,植被覆盖较好以草地为主;年均单位面积植被 NPP 值为  $400 \sim 500 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的北部河谷边缘、东部山前低缓平地 and 博斯腾湖绿洲边缘地带,植被覆盖好以草地、旱地为主;年均单位面积植被 NPP 值大于  $500 \text{ g/m}^2$  的区域主要分布在开孔河流域的西部、北部的河谷地带、中部博斯腾湖绿洲区和南部孔雀河绿洲区,这些区域有大面积的草本沼泽、绿洲和水田,是整个研究区植被覆盖最好的区域。

3.2.2 开孔河流域 NPP 的季节空间分布 对开孔河流域近 13 aNPP 的季节空间分布进行分析,结果表明,根据时间顺序,NPP 高值的集中区从春季在西北部逐渐移动到冬季在东南部;根据 NPP 值在全年所占比重,最高为夏季,占全年的  $65.30\%$ ,其次是春季,占全年的  $17.43\%$ ,再次是秋季,占全年的  $15.14\%$ ,最低为冬季,仅有  $2.13\%$ 。在春季,由于升温快,北部天山中段冰雪融化,补给地表水,植物复苏,NPP 值较高,平均值为  $53.58 \text{ g/m}^2$ ;在夏季,由于开孔河流域降水主要集中在夏季,水热条件好,植物生长茂盛,NPP 值最高,平均值为  $200.69 \text{ g/m}^2$ ;在秋季,光照充足,但降温较迅速,昼夜温差大,植物开始凋落,NPP 值较低,平均值为  $46.52 \text{ g/m}^2$ ;在冬季,由于气温降低、降水稀少,NPP 值最低,平均值为  $6.55 \text{ g/m}^2$ ,最大值仅为  $15 \text{ g/m}^2$ ,主要分布在东南部的平原河谷绿洲区、耕作区和湖泊绿洲区。

3.2.3 开孔河流域 NPP 的空间变化趋势 对开孔河流域近 13 aNPP 的空间变化趋势 Slope 值进行分析,结果表明(附图 3),开孔河流域年际 NPP 也存在明显的空间差异。极显著增加、显著增加、无显著变化、显著减少、极显著减少的面积分别占全流域总面积的  $10.28\%$ ,  $8.94\%$ ,  $75.10\%$ ,  $2.14\%$  和  $3.54\%$ 。其中极显著增加区域主要分布在孔雀河绿洲区和博斯腾湖绿洲区;显著增加区域主要分布在北部草原区和东南部绿洲区边缘;无显著变化区域较大,主要分布在北部山区;显著减少和极显著减少区域很小,零星分布在南部荒漠边缘区、中部山区和平原过渡区、北部山区缓坡和博斯腾湖北部。综上可见,近 13 a 来开孔河流域植被覆盖及其生态系统有所改善,仍具有很大提升的空间。

### 3.3 开孔河流域 NPP 未来变化趋势分析

对开孔河流域近 13 a NPP 的 Hurst 指数与 Slope 趋势空间耦合图进行分析,结果表明(附图 4),NPP 变化前后具有正持续性的区域占流域总面积的  $76.11\%$ ,NPP 变化前后具有反持续性的区域占流域

总面积的 23.89%。耦合情况中 NPP 持续且极显著增加、持续且显著增加,持续且显著减少,持续且极显著减少,无显著变化或无植被区,反持续且极显著减少,反持续且显著减少,反持续且显著增加和反持续且极显著增加区域占全流域面积比依次为 9.17%, 6.82%, 3.27%, 2.02%, 74.80%, 1.18%, 2.19%, 0.42%和 0.13%。NPP 增加(包括持续和反持续)的区域占全流域面积的 16.54%,NPP 减少(包括持续和反持续)的区域占全流域面积的 8.66%,可见开孔河流域的生态系统将有所改善;持续且极显著增加区域主要分布在孔雀河绿洲区和博斯腾湖绿洲区,主要由于尉犁县耕地在持续增加,受人类活动影响较大;NPP 持续且极显著减少区域主要分布在南部荒漠边缘和中部山前区域,植被有所退化;NPP 反持续减少(包括极显著和显著)和反持续增加(包括极显著和显著)区域主要分布在北部山前区域、东部区域和南部耕作区边缘,主要受积雪融水和人类活动影响;NPP 无显著变化或无植被区分布在全流域的西北部、中部、东部等大部分地区,水热条件较稳定,受人类活动影响较小。

#### 4 讨论与结论

本文基于 NDVI 数据、气象数据和植被分类数据,利用修正的 CASA 模型对开孔河流域 2001—2013 年的 NPP 进行了估算,并对时空变化特征进行了分析,结合 Hurst 指数分析了 NPP 未来的变化趋势,可为修正的 CASA 模型在干旱区的应用提供理论依据。

在时间变化上,开孔河流域 NPP 年际变化呈波动中增长的趋势,且年内变化显著,最高为夏季,占全年的 65.30%,最低为冬季,仅有 2.13%,春季和秋季差异不大;在空间变化上,开孔河流域 NPP 空间分布总体特征为西北高、东南低,以开都河和孔雀河为 NPP 高值中心呈带状分布,向四周扩散衰减;在未来变化趋势上,开孔河流域 NPP 增加(包括持续和反持续)的区域占全流域面积的 16.54%,是 NPP 减少区域(包括持续和反持续)占全流域面积比的 2 倍,该流域未来 NPP 主要呈增长趋势,主要得益于塔里木河流域综合治理工程的实施。总体来说开孔河流域生态环境呈良性发展的态势且季节差异明显、区域差异明显。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] Lieth H. Modeling the primary productivity of the world[M] // Primary Productivity of the Biosphere.

Springer Berlin Heidelberg, 1975:237-263.

- [2] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1994,99(3):5263-5283.
- [3] 冯险峰,刘高焕,陈述彭,等. 陆地生态系统净第一性生产力过程模型研究综述[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(3):369-378.
- [4] Lieth H. Primary production: Terrestrial ecosystems [J]. *Human Ecology*, 1973,1(1):303-332.
- [5] Cramer W, Kicklighter D W, Bondeau A, et al. Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results [J]. *Global Change Biology*, 1999,5(S1):1-15.
- [6] Running S W, Thornton P E, Nemani R, et al. Global terrestrial gross and net primary productivity from the earth observing system [M] // Sala O E, Jackson R, Mooney H. *Methods in Ecosystem Science*. New York, USA: Springer-Verlag, 2000:44-57.
- [7] Potter C S, Randerson J T, Field C B, et al. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1993,7(4):811-841.
- [8] Hicke J A, Asner G P, Randerson J T, et al. Satellite-derived increases in net primary productivity across North America 1982-1998 [J]. *Geophysical Research Letters*, 2002,29(10):1427-1431.
- [9] 朴世龙,方精云,郭庆华. 利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力 [J]. *植物生态学报*, 2001, 25(5): 603-608.
- [10] 朱文泉,潘耀忠,张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. *植物生态学报*, 2007,31(3):413-424.
- [11] 王莺,夏文韬,梁天刚. 基于 CASA 模型的甘南地区草地净初级生产力时空动态遥感模拟 [J]. *草业学报*, 2011,20(4):316-324.
- [12] 朱文泉,潘耀忠,龙中华,等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算:以中国内蒙古为例 [J]. *遥感学报*, 2005,9(3):300-307.
- [13] 李卫红,陈忠升,李宝富,等. 新疆开都-孔雀河流域绿洲需水量与稳定性分析 [J]. *冰川冻土*, 2012, 34(6): 1470-1477.
- [14] 王士飞,包安明,王永琴,等. 水情波动下 2006—2011 年塔里木河下游植被变化研究 [J]. *水土保持通报*, 2014,34(4):302-306.
- [15] 周广胜,张新时. 全球气候变化的中国自然植被的净第一性生产力研究 [J]. *植物生态学报*, 1996,20(1):11-19.
- [16] 张志明. 计算蒸发量的原理与方法 [M]. 成都:成都科技大学出版社,1990.

(下转第 230 页)

### 3 讨论与结论

(1) 雨水利用能降低小区雨水外排流量径流系数,促进地表水和地下水良性循环,防治内涝发生,减轻城市面源污染。不同的雨水利用设施减少外排径流系数的成本有明显差别。在实际工作中,应结合小区具体条件,并满足相关规定,兼顾经济、环境与社会效益,明确雨水利用目标,合理确定雨水利用设施规模及构成。建议在《技术规范》中增加雨水利用设施总规模及构成的相关条文。

(2) 以《评价标准》规定的雨水径流总量控制率为限定条件,建筑小区雨水利用设施规模与重现期无关。以《技术规范》规定的外排流量径流系数(0.25~0.40)为限定条件,小区雨水利用设施规模与重现期有关。从提高雨水设计标准,减少内涝发生考虑,建筑小区设计规模应按《技术规范》给出的外排流量径流系数(0.25~0.40)确定。

(3) 本文围绕雨水利用设计的关键问题,以扣损法为基础,结合雨水利用设施增加的雨水利用强度,提出小区雨水利用设计方法。该方法便于计算,易于推广,具有较好的应用价值。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 李俊奇,车武,孟光辉,等.城市雨水利用方案设计与技术经济分析[J].给水排水,2001,27(12):25-28.
- [2] 张书函,丁跃元,陈建刚.城市雨水利用工程设计中的若干关键技术[J].水利学报,2012,43(3):308-314.
- [3] 王文亮,李俊奇,车伍,等.城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究[J].中国给水排水,2014,30(24):12-17.
- [4] 赵世明,赵铨,王耀堂,等.雨水控制与利用系统的计算[J].中国给水排水,2014,30(2):54-57.
- [5] 徐得潜,李兴彩,张丽峰,等.合肥市建筑与小区雨水利用[J].武汉大学学报:工学版,2009,42(6):741-744.
- [6] 张炜,车伍,李俊奇,等.图解法用于雨水渗透下凹式绿地的设计[J].中国给水排水,2008,24(20):35-39.
- [7] 王哲,谢杰,谢强,等.透水铺装地面滞蓄净化城镇雨水径流研究进展[J].环境科学与技术,2013,36(12):138-143.
- [8] 住房和城乡建设部.GB50400-2006 建筑与小区雨水利用工程技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2006.
- [9] 潘安君,张书函,陈建刚,等.城市雨水综合利用技术研究与应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [10] 西安冶金建筑学院,湖南大学.水文学[M].北京:中国建筑工业出版社,1979.
- [11] 住房和城乡建设部.GB50014-2006 室外排水设计规范[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [12] 住房和城乡建设部.GB/T50378-2014 绿色建筑评价标准[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [13] 郑克白,徐宏庆,康晓鸥,等.北京市《雨水控制与利用工程设计规范》解读[J].给水排水,2014,40(5):55-60.
- [14] 王彩娟.合肥市建筑与小区雨水及中水利用研究[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [15] 北京市规划委员会.DB11-685-2013 雨水控制与利用工程设计规范[S].北京:2014.
- [16] 解刚,王向东.北京市房地产类建设项目下凹式绿地的雨水拦蓄能力及挖深研究[J].水土保持通报,2013,33(2):144-150.
- [17] 程江,徐启新,杨凯,等.下凹式绿地雨水渗蓄效应及其影响因素[J].给水排水,2007,33(5):45-49.
- [18] 魏俊岭,金友前,郜红建,等.合肥市绿地土壤水分入渗性能研究[J].中国农学通报,2012,28(25):302-307.
- [17] 郑中,祁元,潘小多,等.基于 WRF 模式数据和 CASA 模型的青海湖流域草地 NPP 估算研究[J].冰川冻土,2013,35(2):465-474.
- [18] Hurst H E. Long-term storage capacity of reservoirs [J]. Transactions of the American Society of Civil Engineers 1951,116(12):776-808.
- [19] Mandelbrot B B, Wallis J R. Some long-run properties of geophysical records[J]. Water Resources Research, 1969,5(2):321-340.
- [20] 陈彦光,靳军.地理学基础理论研究的方法变革及其发展前景[J].干旱区地理,2003,26(2):97-102.
- [21] 江田汉,邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J].地理科学,2004,24(2):177-182.
- [22] Liang Shunlin, Yi Qiuxiang, Liu Jinping. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015(58):64-76.
- [23] Peng Jian, Liu Zhenhuan, Liu Yinghui, et al. Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai-Tibet Plateau using Hurst Exponent[J]. Ecological Indicators, 2012,14(1):28-39.

(上接第 224 页)