

DOI: 10.5846/stxb201411202301

李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. 生态学报, 2016, 36(13): - .

Li C H, Zhao J, Shi Y F, Hu X F. The impact of human activities on net primary productivity based on the coefficient of variation: A case study of the Shiyang River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): - .

## 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究 ——以石羊河流域为例

李传华\*, 赵 军, 师银芳, 胡秀芳

西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**摘要:** 人类活动是 NPP 变化的重要影响因子, 定量计算 NPP 人为影响值具有较重要的意义。论文提出基于变异系数法的 NPP 人为影响模型, 对其基本概念、理论基础、计算流程等进行了阐述, 并以石羊河流域为研究区, 分析该流域 NPP 人为影响分布规律。研究结果表明: (1) 该模型基于一种间接计算的思想回避了人为作用的复杂过程, 模型理论科学, 以变异系数为参数, 所需参数少, 技术可行, 计算结果为 NPP 值, 易于定量评价。(2) 2000—2010 年期间, 石羊河流域人类活动对植被 NPP 的影响广泛而严重, 年均影响值大于  $40\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  的面积占 96.21%, 影响程度严重以上占 26.94%。NPP 人为正负影响均较大, 正影响年均均为  $1.63 \times 10^6\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 负影响年均均为  $1.21 \times 10^6\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 年均净增加  $4.20 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ; 正向平均影响强度为  $136.84\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 负向平均影响强度为  $100.32\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 全流域表现为正影响。(3) 凉州区是人为影响最为剧烈的地区, 表现为强烈正影响; 其次是天祝县, 为强烈负影响; 接下来是民勤县, 表现为正影响; 其它县区依次是永昌、古浪、肃南和金昌。(4) 2000—2010 期间, NPP 人为影响值变化较大, 人为活动减弱面积占 53.90%, 增加占 46.10%; 影响值正向减弱  $8.12 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 负向减弱  $8.07 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 正向增强  $8.02 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 负向增强  $3.94 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 人为活动影响净减少  $4.25 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , 人为作用总体呈减弱趋势。

**关键词:** 净第一性生产力; 变异系数; 人为影响模型; 石羊河流域

## The impact of human activities on net primary productivity based on the coefficient of variation: A case study of the Shiyang River Basin

LI Chuanhua\*, ZHAO Jun, SHI Yinfang, HU Xiufang

**Abstract:** Human activities can heavily influence changes in net primary productivity (NPP), and for this reason, the quantitative calculation of NPP as influenced by humans ( $\text{NPP}_H$ ) has a vital significance. In this paper, a model of human impact on NPP is proposed based on the coefficient of variation. The basic concept, theoretical foundation, and calculation are discussed, and the distribution and variation of  $\text{NPP}_H$  in the Shiyang River Basin are analyzed. The following conclusions were made. (1) The model is based on the indirect method, which avoids the complexities of human activity. In addition, the  $\text{NPP}_H$  model has other advantages, including its scientificity in theory, fewer input parameters as it uses only the coefficient of variation, feasibility and easy obtainability technology, and a straightforward quantitative evaluation of human activity on NPP. (2) The effect of human activity on NPP was widespread and severe in the Shiyang River Basin during 2000—2010. The area with an annual average  $\text{NPP}_H$  value greater than  $40\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  was 96.21%, and the area with a degree of human impact greater than severe was 20%. There were two main features when the spatial distribution of the influence of human activities on NPP was considered. The first was the intense positive influence of human activity on three oases (Minqin, Wuwei, and Jinchang), where there is cultivated land, and the second is the strong negative influence on the junction of Sunan, Tianzhu, Gulang, and Yongchang, where the vegetation consists mainly of grassland and the predominant human-related activity is grazing. Thus, the human impact on NPP was both positive and negative, and significant for both. The average positive annual value as affected by humans was  $1.63 \times 10^6\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , and the negative value was  $1.21 \times 10^6\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , producing a net value of  $4.20 \times 10^5\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ . The positive effect averaged  $136.84\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ , and the corresponding negative effect was

基金项目: 国家自然科学基金(41261104)

收稿日期: 2014-11-20; 网络出版日期: 2015-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lch\_nwnu@126.com

100.32 gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>; therefore, overall, the Shiyang River Basin was positively influenced by humans. The degree of human impact on different areas varied from slight to general, serious, and severe, with the percentages gradually decreasing from 45.96% to 27.11%, 18.58%, and 8.38%, respectively. The areas of positive and negative influence were roughly equal in degree, but the positive influence was slightly more than negative in the severe and general degree categories, and the negative influence was slightly more than the positive in the slight and serious degree areas. (3) Ganzhou county was the area most intensely and positively influenced by human activity. In contrast, Tianzhu county showed a strong negative influence. Minqin county showed a positive influence, which positive effect of the total in second place and effect of average in three place and negative effect all in second about total and average. The other areas influenced by human activity were Yongchang, Gulang, Sunan and Jinchang. (4) The NPP<sub>H</sub> varied greatly in this period and showed as decreasing trend. In some regions, human influence has decreased (53.9%), while in other areas human activity has enhanced (46.1%). The positive effect was weakened by  $8.12 \times 10^5$  gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, the negative effect was weakened by  $8.07 \times 10^5$  gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, and the positive effect was enhanced by  $8.02 \times 10^5$  gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, and the negative effect was enhanced by  $3.94 \times 10^5$  gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, giving a net reduction of  $4.25 \times 10^5$  gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>, indicating that overall, human activity showed a decreasing trend.

**Keywords:** net primary productivity; coefficient of variation; human effect model; Shiyang River Basin

植被净第一性生产力(简称 NPP)是衡量生态环境的重要指标,同时与碳平衡和碳扰动、土地利用变化、气候变化和粮食安全等关系密切,是表征陆地生态过程的关键参数<sup>[1-4]</sup>。NPP 的变化是自然和人类活动交互作用的结果,随着科技进步人类活动能力日益增强,无论影响的手段与方式,还是影响的广度与深度都发生了很大的变化,人类活动的作用显得越来越重要,有些地区甚至为主导作用<sup>[5-9]</sup>。

由于人类活动方式各异,加上地形、土壤、植被以及气候条件等差异,即使相同的人类活动对 NPP 的影响也不一样,因此人类活动对植被 NPP 的影响较难量化,一般以定性说明为主。也有学者对人类活动影响进行定量研究,目前主要方法有残差分析法<sup>[10-13]</sup>,如黄森旺等运用残差法模型结合气候因子降雨评价了三北防护林工程区人类活动对土地退化所起的作用,此方法原理简单易计算,但不适合短时间段分析,在拟合气候与植被生长关系时也不能完全忽略人为作用影响。降水利用效率分析法<sup>[14-17]</sup>,如杜加强等运用植被降雨利用效率,结合 NDVI 变化辨识在人为作用下生态退化和生态恢复的区域范围,此方法存在不确定性,降雨的剧烈变化对结果有较大影响。模型变量控制法<sup>[18-20]</sup>,如田汉勤等利用新一代多因子驱动的陆地生态系统动态模型(Dynamic Land Ecosystem Model, DLEM),旨在定量模拟和分析自然因素和人类活动双重驱动下陆地生态系统过程和格局的变化,以及陆地生态系统与人类系统、气候系统之间的相互作用与反馈,此方法可根据机理直接计算人为影响值,但需要参数较多,过程比较复杂。实际 NPP 与潜在 NPP 求差法<sup>[21]</sup>,周伟等采用潜在 NPP 与实际 NPP 求差法,评价了中国西北地区气候变化与人为作用对沙漠化的影响。该方法原理简单容易计算,不足之处是潜在 NPP 是虚拟值,有较大的不确定性,并且潜在植被为该区域植被演替的最高形态,潜在 NPP 一般比实际值偏高,对 NPP 人为影响值结果有影响。还有人为影响强度法<sup>[22-25]</sup>、直接对比法等。

总体来看,上述计算方法各有特点,也各有局限,如,有的方法无法区分人为作用的正(使 NPP 增加)负(使 NPP 减少)方向,有的方法不能计算影响值,还有的方法只适合长时序数据和大范围,不确定性问题也较多;有的方法模型复杂,参数不易获取,不能计算人为活动间接影响等。因此,本研究试图提出一种新的计算模型,一方面能够定量评估人为活动对 NPP 的影响,在理论方法上也是对该研究领域的一个有益补充。

石羊河流域是人类活动对环境影响最为剧烈的地区之一,在人为作用下该地区生态环境极度恶化,植被退化严重<sup>[26-32]</sup>,引起各级政府的高度关注。2006 年以来,该流域实施生态环境治理工程,到 2010 年完成一期工程,据报道部分地区生态环境有所好转<sup>[33-34]</sup>,该区域人类活动对植被正向与负向影响均十分典型。因此,以该流域为研究区,以植被 NPP 为对象,区分气候变化与人为作用对 NPP 变化的影响,定量计算 NPP 人为影响值,研究植被 NPP 对人类活动的响应具有重要的科学意义,同时能为退化生态环境恢复与重建等工作提供决策支持。

## 1 研究区概况与数据

### 1.1 研究区概况

石羊河流域地处黄土、青藏、蒙新三大高原的交汇过渡带,位于甘肃省河西走廊东部,祁连山北麓,介于

101°22'E—104°16'E、36°29'N—39°27'N,流域面积 4.16 万 km<sup>2</sup>。石羊河流域深居大陆腹地,属大陆性温带干旱气候。流域可分为南部祁连山地,中部走廊平原区,北部低山丘陵区及荒漠区四大地貌单元。流域行政区划涉及 3 市 8 县,包括武威市的古浪县、凉州区、民勤县全部及天祝县部分,金昌市的永昌县及金川区全部以及张掖市肃南裕固族自治县的皇城镇(简称肃南县)和山丹县部分地区(面积很小,忽略不计)。

## 1.2 数据

本研究所用的数据有 MODIS 遥感数据、温度与降雨数据、土地利用数据。2000—2010 年 NPP 数据为 MODIS 数据中的 4 级产品,产品类型为 MOD17A3,空间分辨率为 1km,该数据利用 BIOME-BGC 模型估算得到陆地生态系统 NPP 年累积量,该数据已在全球和区域 NPP 与碳循环研究中得到广泛应用。温度、降雨和土地利用数据来自于中国西部环境与生态科学数据中心。

## 2 研究方法

植被 NPP 是在人为作用和气候作用的双重影响下形成,如果能得到自然状态下(只受气候作用)的植被 NPP(称之为理论 NPP),再与实际 NPP 求差,即为 NPP 人为影响值,这是一个间接并且简洁的思路。一般来说,可以采用 NPP 气候学模型(只与气候因子有关)计算潜在 NPP 作为理论值,但潜在植被是在无人为干扰下立地所能发育的顶级植被类型,而理论 NPP 为目前气候状况下无人为干扰下立地发育的实际 NPP,一般情况下潜在 NPP 比理论 NPP 高。因此,理论 NPP 的计算归结到找出无人影响点,其所对应的实际 NPP(MOD17A3 数据)便可看成理论 NPP。那么,如何确定某处是否受到人为影响,用什么参数来区分是一个关键的问题。

### 2.1 理论基础

在自然状况下,NPP 只受气候变化影响,因此可以这样理解,在无人为影响下,NPP 的变化特征应与气候变化特征一致。考虑到变异系数能表达序列数据变化的离散程度,因此考虑使用变异系数来衡量 NPP 变化与气候变化特征是否一致。理论假设是:如果 NPP 变异系数等于气候因子变异系数或者相差在一定的范围之内,表明该栅格单元只受到气候因子的作用,否则同时受到人类活动的影响,两个变异系数之差即为人类活动下 NPP 变异程度,称人为变异系数。因此,建立关于变异系数的数学模型,空间上可以区分哪些地区受到人类活动的影响,值的大小可以区分人类活动对植被 NPP 变化影响的变异程度,该方法称之为变异系数法。

### 2.2 变异系数法

#### 2.2.1 人为变异系数计算

##### (1) 变异系数

变异系数(Coefficient of Variation,简称 CV)是衡量序列观测值离散程度的一个统计量。如果度量单位与平均值相同,可以直接利用标准差来比较;不同则需采用标准差与平均值的比值来比较,比值称为变异系数,计算公式为:

$$CV = \sigma / |\mu| \quad (1)$$

式中, CV 为变异系数,  $\sigma$  为标准差,  $\mu$  为算术平均值。

##### (2) 实际 NPP、气温与降雨变异系数

将各栅格单元序列 NPP、气温与降雨分别代入式(1)计算即可,  $CV_{NPP}$ 、 $CV_T$ 、 $CV_R$  分别表示实际 NPP 变异系数、气温变异系数、降雨变异系数。

$$CV_{NPP} = \sigma_{NPP} / |\mu_{NPP}| \quad (2)$$

$$CV_T = \sigma_T / |\mu_T| \quad (3)$$

$$CV_R = \sigma_R / |\mu_R| \quad (4)$$

##### (3) 气候变异系数计算

从 NPP 的定义来看, NPP 的变化取决于降水量和最大蒸散量两个分量<sup>[35]</sup>, 国内外研究表明, 气温和太阳辐射是导致最大蒸散量变化的主要因子<sup>[36-37]</sup>, 而气温与太阳辐射也有相关性, 同时考虑到模型参数的一般性, 本研究将气温、降水作为气候的主要因子。在计算气候变异系数过程中, 确定气温与降雨对 NPP 的影响权重采用模型偏导法, 本研究采用周广胜模型<sup>[38]</sup>, 对积温和降水因子求偏导后乘以积温和降水得到各自对 NPP 的影响权重  $W_T$  和  $W_R$ , 乘以各自变异系数最后求和即得到气候因子变异系数  $CV_C$ , 见下式:

$$CV_C = W_T \cdot CV_T + W_R \cdot CV_R \quad (5)$$

#### (4) 人为变异系数

如果各栅格的 NPP 变异系数等于气候因子变异系数或者两者之差在一定的范围之内, 说明该栅格 NPP 变化基本受气候影响, 否则同时受到人为影响, 两者之差称为人为变异系数  $CV_H$ , 计算公式为:

$$CV_H = CV_{NPP} - CV_C \quad (6)$$

理论上讲, 人为变异系数表示人为作用对 NPP 影响的变异程度, 值为 0 或在 0 附近表示不受人为作用影响或影响甚微; 值不为 0 或绝对值大于某个极小值表示受到人为作用影响, 绝对值越大表示 NPP 受到人为影响的变异程度越大。变异系数的正负号说明人为活动对 NPP 的作用方向, 符号为正表示实际 NPP 变异系数大于气候变异系数, 说明 NPP 在人为作用下变化剧烈, 这种情况一般是 NPP 在人为作用下减少, 为负影响。符号为负表示实际 NPP 变异系数小于气候变异系数, 这说明实际 NPP 在人为作用下保持稳定, 这种情况一般是 NPP 在人为作用下增加, 为正影响。人为变异系数是一个统计值, 不是衡量植被 NPP 生态机理的参数, 在影响机制上是没有任何意义的。在大数据样本的前提下, 统计值存在一些误差或者小概率事件。不过, 如果某处为无人为影响点, 该点的人为变异系数肯定为 0, 基于此即可保证本模型的确性。

### 2.2.2 NPP 人为影响值计算

人为变异系数是衡量人为作用对 NPP 影响的变异程度而不是影响程度, 因此人为变异系数大小与 NPP 人为影响值并无数学关系, 无法使用人为变异系数直接计算 NPP 人为影响值。根据理论假设, 要计算 NPP 人为影响值首先要计算理论 NPP, 需根据人为变异系数来选择无人为影响点。

#### (1) 选择无人为影响点位

提取无人影响点位至关重要, 方法如下: 提取人为变异系数绝对值在 0 附近的栅格, 为了防止出现人为变异系数为 0 而实际上是有人为影响的情况, 此环节需要逐点判断实际 NPP 变化与气候变化是否一致, 一致保留, 否则去除。在此基础之上, 还需要结合实际情况来判断是否确实无人为影响。原则如下: 如一些非常明显受到人为影响的点位(如耕地)需要去掉, 离居民点比较近也认为受到人为影响需要去掉。判断可以结合遥感影像、DEM、土地利用现状图, 甚至实地考察确定。

#### (2) 理论 NPP 计算

无人为影响点位确定后, 提取对应点位实际 NPP 即为理论 NPP (Theoretical NPP, 简写  $NPP_T$ )。采用空间插值方法对离散点进行空间化即可得到全流域理论 NPP。

#### (3) NPP 人为影响值计算

将实际 NPP (Actual NPP, 简称  $NPP_A$ ) 减去理论 NPP, 即可得到人为作用下 NPP 变化值, 称为 NPP 人为影响值 (NPP influenced by human, 简写  $NPP_H$ ), 公式为:

$$NPP_H = NPP_A - NPP_T \quad (7)$$

符号为正说明人为作用下 NPP 增加, 符号为负说明在人为作用下 NPP 减少。

## 3 结果与分析

以石羊河流域为研究区, 根据变异系数法计算该流域 2000—2010 年期间历年 NPP 人为影响值, 分析 NPP 人为影响值空间分布规律和变化趋势。

### 3.1 人为变异系数

根据公式(2)和(5)计算实际 NPP 变异系数和气候变异系数, 再根据公式(6)计算人为变异系数, 结果见

图 1。

变异系数小于 0 的区域主要分布在民勤绿洲、武威绿洲和金昌绿洲,上述地区是人类活动的主要区域,在人为直接干预下,植被 NPP 稳定,类型以耕地为主,为人类活动直接影响区域。变异系数在 0 附近的区域主要分布在肃南、天祝、古浪东部,该地区的植被类型主要为天然草地与林地,人口稀少,人为活动不太频繁,NPP 主要受气候变化影响,其变异程度与气候变异程度基本一致,人为干扰不大。变异系数大于 0 的地区主要分布在永昌与古浪县境内,肃南县北部、天祝北部与凉州南部也有分布,植被以草地为主,主要人为活动为放牧,NPP 变化最大,为人类活动直接影响地区。

同时,人为变异系数正负值在各地类均存在,有多种地类的正负变异程度都较大,如草地、盐碱地、沙地和戈壁等,这主要取决于人类作用方式与程度。比如草地,过度放牧导致草地退化,则人为变异系数为正;对于科学管理(灌溉、施肥与轮牧等措施)的草地,人为变异系数则为负。有的植被 NPP 值较低,自身容易受到外界干扰也是同一种植被的人为变异系数有正有负的重要原因。

### 3.2 NPP 人为影响值

NPP 人为影响值的计算首先要提取无人影响点位,步骤如下:提取人为变异系数绝对值在 0 附近的栅格,本研究取值为 0.0005,逐点判断其变化趋势与气候变化趋势是否一致,不一致去除,再结合遥感影像,DEM,土地利用类型图逐点判断无人影响点位的分布是否符合实际,有些地区点分布太过密集也可以选择除掉一些,最后选择点位 117 个,分布见图 2。

可以看出,无人影响点分布从上游到下游逐渐减少,其中肃南县分布最多,地类以林地、草地为主;其次是天祝和永昌县,草地最多,其次是林地,还包括部分戈壁、裸岩;民勤、古浪、凉州分布点较少,古浪、凉州以草地为主,民勤以盐碱地为主。

无人影响点位栅格单元所受人为影响非常小,对应的 NPP 实际值可以看成植被 NPP 理论值。将无人影响点与 NPP 图层叠加,提取栅格单元对应的实际 NPP,再空间插值(本研究采用 IDW)得到全流域植被 NPP 理论值,结果见图 3。可以看出,NPP 理论值具有明显的纬度地带性和垂直地带性特征,从南向北,海拔从高到低理论 NPP 逐渐减少,并且在永昌、肃南、天祝凉州、古浪县区相互交界处有明显分界线。按行政区来看,天祝和肃南两县 NPP 理论值最高,其它县区较低。

将实际 NPP 减去植被理论 NPP,得到 NPP 人为影响值,为了便于分析,对 NPP 人为影响值正负分开,再进行分级,结果见图 4。NPP 人为影响值空间分布最显著的特征有两处,一是三大绿洲人为正影响强烈,绿洲

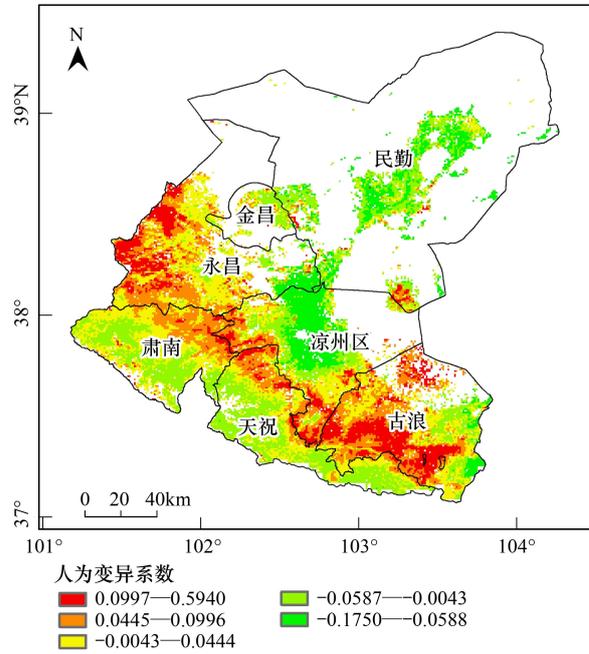


图 1 人为变异系数分布  
Fig.1 Spatial distribution of CV<sub>H</sub>

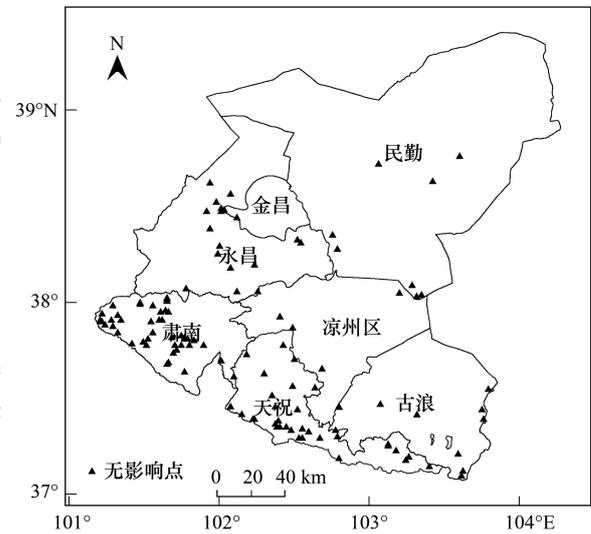


图 2 无人影响点分布  
Fig.2 Location of point without the influence of human

属于人为直接活动区,多为耕地,人为正向影响较易理解;二是在肃南、天祝、古浪、永昌几县相互交界处负向作用显著,且呈带状分布(见图4红线区域)。结合DEM分析,此带状分布带为石羊河流域出山口,该区域地形变化剧烈,植被以草地为主、水资源丰富,人为活动多为放牧,人为负作用严重。以上结果可以看出,基于变异系数法的NPP人为影响值结果符合实际。

2000—2010年期间,石羊河流域人为影响正负分级见图4,对NPP人为影响值进行自然分级,依次为轻微、一般、严重与剧烈,见表1。可以看出,人类活动对植被NPP的影响覆盖了大部分区域,年均影响值小于 $40\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ 的面积所占比例仅为3.79%。在人为作用下,全流域NPP年均增加值为 $1629271\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,年均减少值为 $1209281\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,年均净增加 $419990\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,说明人为作用对全流域植被NPP的正负影响均十分剧烈,整体为正影响。

从影响面积来看,从轻微到剧烈,面积逐渐减少,轻微占45.96%,一般占27.11%,严重占18.58%,剧烈占8.36%。人为作用严重程度以上面积占26.94%,充分说明该地区人为作用严重程度。从正负影响的面积来看,各程度正负影响面积大致相当,剧烈与一般程度正向影响面积略大于负向,严重与轻微程度正向影响面积略小于负向,整体来看基本持平。从影响值来看,除了轻微程度负向影响值大于正向外,其余程度均为正向影响值大于负向影响,栅格单元影响值(称单元影响强度)正向大于负向,全流域人为作用呈正影响。从分布的格局来看,正向与负向影响在各行政区均有分布,正向影响剧烈程度主要分布在武威绿洲、昌宁绿洲,严重程度主要分布在民勤绿洲、天祝东部、肃南中部,一般程度分布在永昌西部。负向影响剧烈的区域主要分布在天祝凉州古浪三县交界部,严重的区域分布在古浪县南部、永昌肃南两县交界处,一般的区域主要分布在古浪北部、肃南南部以及民勤绿洲周边地区。

从各行政区来看,见表2,NPP人为正向影响总量凉州区最大为 $652285\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,其次是民勤,接下来是永昌、天祝、古浪等;影响强度也是凉州最大为 $235.99\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,接下来是金昌、民勤、天祝等。负向影响总量最大的是天祝县,影响值为 $322510\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,接下来依次为古浪、肃南、永昌与凉州等地;影响强度最大的是天祝为 $136.25\text{gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,其它依次为肃南、凉州、永昌等地。上述关于影响强度的结论与石培基等<sup>[39]</sup>关于土地人工覆被指数(LCI)研究结论相似,LCI指数最大为金昌、民勤,最小为肃南。

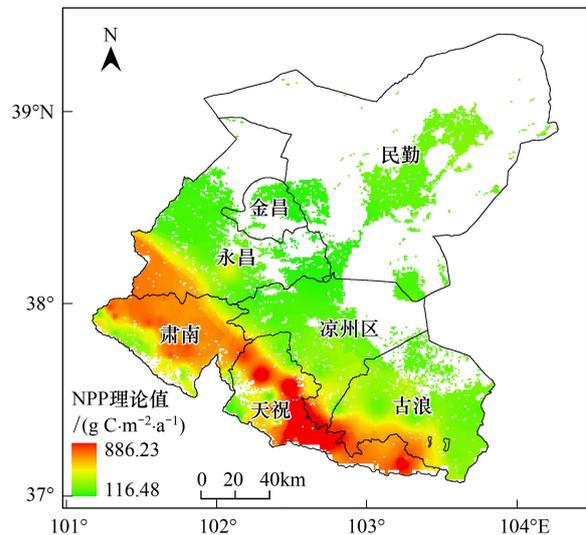


图3 植被理论NPP

Fig.3 Theoretical NPP of vegetation

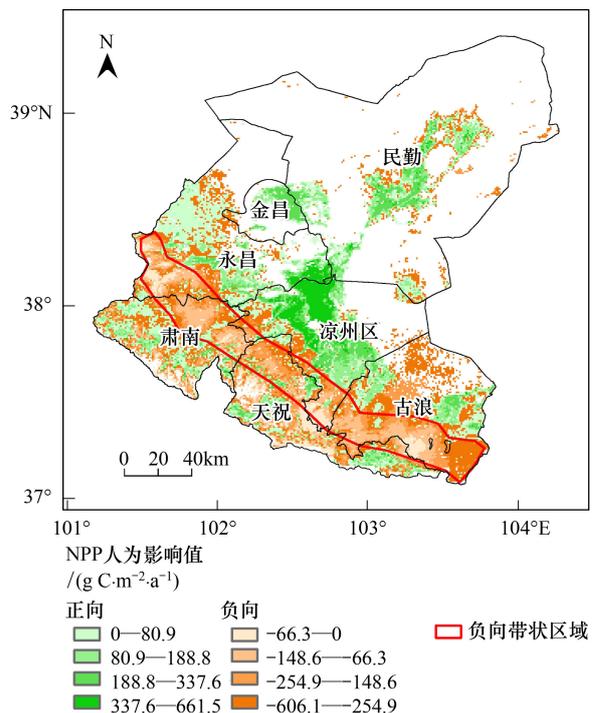


图4 2000—2010年NPP人为影响值分布

Fig.4 Spatial distribution of NPP<sub>H</sub> during 2000—2010

表 1 人为影响程度与方向统计(2000—2010) (gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)

Table 1 Statistic of degree and direction by human influence(2000—2010)

影响程度 Degree	影响方向 Direction	数量/个 Number	比例/% Ratio	影响值 NPP <sub>H</sub>	平均值 Mean
轻微 Slight	负	5797	24.19	-170953	-29.49
	正	5216	21.77	170669	32.72
一般 General	负	3112	12.99	-320872	-103.11
	正	3382	14.12	437223	129.28
严重 Serious	负	2261	9.44	-438490	-193.94
	正	2189	9.14	543889	248.47
剧烈 Severe	负	884	3.69	-278965	-315.57
	正	1119	4.67	477489	426.71
汇总 Sum	负	12054	50.31	-1209280	-100.32
	正	11906	49.69	1629270	136.84

表 2 2000—2010 年各行政区 NPP 人为影响值(gCm<sup>-2</sup>a<sup>-1</sup>)

Table 2 Each district's NPP influenced by Human in 2000—2010

行政区 Region	负 Negative			正 Positive		
	数量/个 Number	总量 Amount	强度 Intension	数量/个 Number	总量 Amount	强度 Intension
7 金昌(+)	48	-767	-15.97	415	71710	172.80
6 肃南(-)	2133	-225375	-105.66	1440	103067	71.57
4 永昌(+)	2055	-195288	-95.03	2478	237799	95.96
3 民勤(+)	860	-32023	-37.24	2359	314985	133.53
2 天祝(-)	2367	-322510	-136.25	1249	137869	110.38
5 古浪(-)	3471	-316798	-91.27	1201	111556	92.89
1 凉州(+)	1120	-116520	-104.04	2764	652285	235.99

表格第一列前面的数字表示人为影响排序,后面的正负号表示人为整体影响方向

综合来看,凉州区是人为影响最为剧烈的地区,表现为强烈正影响。其次是天祝县,为强烈负影响。接下来是民勤县,表现为正影响,其正影响总量排第二,影响强度排第三;负影响总量与强度都排倒数第二。其它县区依次是永昌、古浪、肃南和金昌。

### 3.3 NPP 人为影响变化

根据变异系数法计算各栅格历年 NPP 人为影响值,并采用 Sen 方法<sup>[40]</sup>,Sen 趋势计算如下:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{NPP_{Hj} - NPP_{Hi}}{j - i}\right), \forall j > i \quad (8)$$

式中,11>j>i>0,Median 为中位数的函数,β 为 Sen 趋势度,表示 NPP<sub>H</sub> 增强或减少趋势的程度,若 β>0 则 NPP<sub>H</sub> 有增加的趋势,值越大表示增加程度越大;若 β<0 则 NPP<sub>H</sub> 有减少的趋势,值越小表示减小程度越大。计算出 2000—2010 年期间人为影响 NPP 变化趋势,结果见图 5。

可以看出,民勤绿洲、武威绿洲人为作用呈减弱趋势,图 4 中负向带状区域也呈减弱趋势;昌宁绿洲、凉州与古浪交界处北端、永昌西南部、天祝东南角等人为作用呈加强趋势。为了进一步的分析人为作用下 NPP 变

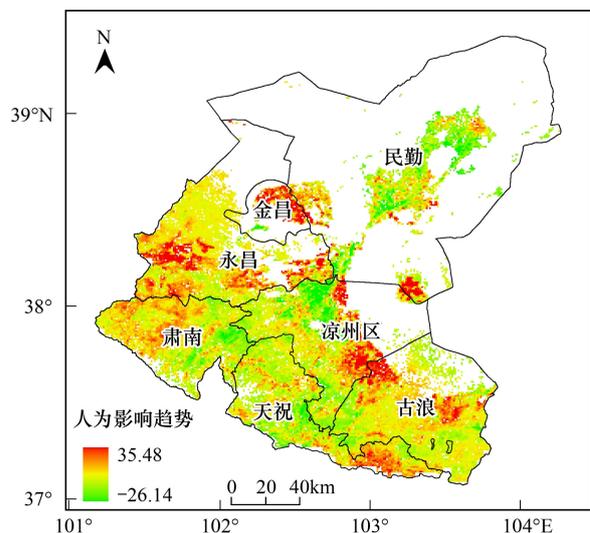


图 5 NPP 人为影响变化趋势(SEN)

Fig.5 Change trend of NPP<sub>H</sub>

化规律,将 NPP 人为影响的正负方向与影响趋势结合起来,空间分布见图 6。为了表述简便起见,将人为影响方向和影响趋势分为四个组合,分别为负负、负正、正负与正正,其中负负表示影响值是负值,影响趋势减弱;负正表示影响值是正值,影响趋势减弱;正负表示影响值是负值,影响趋势增强;正正表示影响值是正值,影响趋势增强。负负主要分布在民勤绿洲周围,肃南与凉州交界处,天祝古浪凉州三县交界处,以及古浪南部和北部等地,这些均为负向作用比较显著的地区,人为负向作用强度有所减弱。负正主要分布在民勤绿洲、武威绿洲以及永昌西部等地,这些均属于绿洲灌区,说明正向作用强度也有所减弱。正负主要分布在肃南永昌交界处以及古浪中部,负向作用强度有所增加。正正主要分布在昌宁绿洲、永昌东南部、凉州与古浪交界处,以及天祝东南角,这些区域人为正向作用加强。

各行政区人为作用 NPP 变化方向和趋势见表 3。金昌县正正分布比例最大,为 76.48%,表明人为正向影响在该县占绝对地位,并且不断加强。肃南县负负分布面积最大,占 35.59%,表明人为负向作用不断减弱,正负与正正也分别占 24.07%和 24.01%,表明正向与负向作用加强的地区同样大量存在。永昌县正正与正负均较大,表明人为正向与负向影响均呈增加趋势。民勤县负正分布最多,占 44.67%,表明正向作用趋势在减弱。天祝和古浪负负分布面积最大,分别占全县 50.24%和 43.28%,表明人为负向作用在减弱。凉州区负正分布面积最大,人为正向作用减弱。上述关于人为影响变化趋势的结论与石培基等<sup>[39]</sup>结论中得出 LCI 指数金昌大幅增加、肃南减小、永昌增加、民勤减小、天祝减小、古浪增加、凉州减小”结论相似。

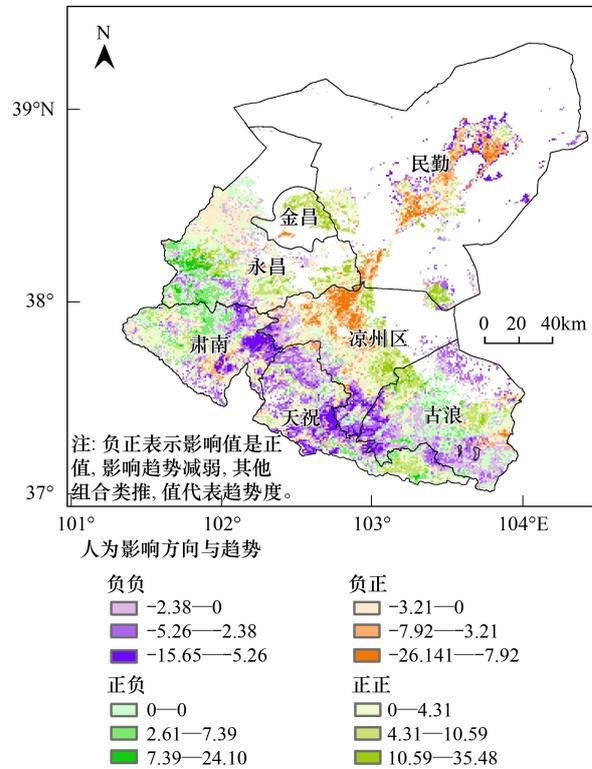


图 6 NPP 人为影响变化方向与趋势  
Fig.6 Distribution of NPP<sub>h</sub>'s direction and trend

表 3 各行政区人为作用 NPP 变化方向和趋势(栅格数)

Table 3 Each district NPPH's change direction and trend

行政区 Region	方向与趋势 Direction and trend			
	负负/% Negative-negative	负正/% Negative-positive	正负/% Positive-negative	正正/% Positive-positive
金昌	17(3.74)	59(12.97)	31(6.81)	348(76.48)
肃南	1257(35.59)	577(16.34)	850(24.07)	848(24.01)
永昌	778(17.51)	886(19.95)	1241(27.94)	1537(34.60)
民勤	791(24.66)	1433(44.67)	66(2.06)	918(28.62)
天祝	1778(50.24)	424(11.98)	533(15.06)	804(22.72)
古浪	2012(43.28)	376(8.09)	1442(31.02)	819(17.62)
凉州	853(23.33)	1504(39.37)	236(6.18)	1227(32.12)

综合来看,金昌境内人类活动区域为灌溉绿洲,耕地面积有所增加,表现为正影响,并且正向作用加强。肃南境内的草地和林地实施封山养育后得到逐步的恢复,表现为人为负影响在减弱。永昌耕地面积增加,并且林地与草地有进一步退化的趋势,人为正向与负向作用均呈加强趋势。民勤县生态移民后,绿洲的部分耕地退耕为草地和林地,正向作用趋势减弱;但绿洲部分边缘植被退化严重,荒漠化加剧,导致部分地区负向影响在加剧,但整体表现为人为作用减弱。天祝与古浪县境内部分林地被划为祁连山水源涵养林保护范围内,

并对退化较为严重的林地和草地进行封育,退化趋势有所缓解,人为负向影响减弱。凉州区境内的南部山区,坡耕地实施退耕还林还草,部分耕地由保灌地调整为非保灌地,人为正向影响减弱;在灌溉用水能得到较好保障的耕地,由于提高了管理水平,人为正向影响加强,整体表现为人为正向作用减弱。总之,2000—2010 年期间全流域 NPP 人为影响变化较大,人为正向与负向的减弱和加强均存在,经统计,正向减弱值年均为  $812919.65 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,负向减弱值年均为  $807622.72 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,正向增强值年均为  $802274.08 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,负向增强值年均为  $393719.73 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,人为活动影响值年均净减少  $424548.60 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,表明该流域人为作用范围与影响值均有所减少。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

理论方面:(1)本研究提出了一种基于变异系数的 NPP 人为影响值计算方法。通过理论阐述、应用实践证明,表明该方法理论科学,技术可行、结果符合实际情况,模型具有较好的科学性。(2)模型计算结果为 NPP 值,量化结果容易定量评价人为活动对植被的影响,模型具有较好的实用性。(3)方法基于一种间接计算的思想,回避了人为作用的复杂过程,模型所需参数少,资料易获取,模型具有较好的推广性。

应用方面:(1)2000—2010 期间,石羊河流域人类活动对植被 NPP 的影响广泛而剧烈,年均影响值大于  $40 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$  的面积占 96.21%,影响程度严重以上占 26.94%。(2)人为作用对流域 NPP 影响有正向影响和负向影响,影响值均较大,年均增加为  $1.63 \times 10^6 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,年均减少为  $1.21 \times 10^6 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,年均净增加  $4.20 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ;负向平均影响强度为  $100.32 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,正向平均影响强度为  $136.84 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,全流域表现为正影响。(3)各行政区 NPP 人为影响排序为:凉州、天祝、民勤、永昌、古浪、肃南、金昌等。(4)2000—2010 期间,NPP 人为影响值变化较大,从面积来看,人为活动减弱面积占 53.90%,增加占 46.10%;影响值方面,正向减弱  $8.13 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,负向减弱  $8.08 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,正向增强  $8.02 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,负向增强  $3.94 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,人为活动影响净减少  $4.25 \times 10^5 \text{ gCm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,人为作用总体呈减弱趋势。

### 4.2 讨论

(1)气候因素本身也是受到人类活动影响,用 NPP 变异系数减去气候变异系数来区分人类活动对植被 NPP 的影响,特别是在长时间序列中,如何在模型中滤除人类活动对气候的影响需要进一步讨论。

(2)人为变异系数在 0 附近的区域,并不完全能够表示此处没有人为活动影响,或许是 NPP 变异系数与气候变异系数正好相等的巧合,选择无人影响区域需要实地抽样验证。

(3)计算方法对结果的影响。采用潜在植被 NPP 值减去实际植被 NPP 理论值来计算 NPP 人为影响值,与潜在植被 NPP 公式关系较大,科学选择公式对结果计算尤为重要。再加上现有气象站点的分布格局与密度还不够,对计算结果也造成影响。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Hayes D J, Turner D P, Stinson G, McGuire A D, Wei Y X, West T O, Heath L S, de Jong B, McConkey B G, Birdsey R A, Kurz W A, Jacobson A R, Huntzinger D N, Pan Y D, Post W M, Cook R B. Reconciling estimates of the contemporary North American carbon balance among terrestrial biosphere models, atmospheric inversions, and a new approach for estimating net ecosystem exchange from inventory-based data. *Global Change Biology*, 2012, 18(4): 1282-1299.
- [ 2 ] 陈福军, 沈彦俊, 李倩, 郭英, 徐丽梅. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究. *地理科学*, 2011, 31(11): 1409-1414.
- [ 3 ] Arevalo C B M, Bhatti J S, Chang S X, Sidders D. Land use change effects on ecosystem carbon balance: from agricultural to hybrid poplar plantation. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 141(3/4): 342-349.
- [ 4 ] Zhang G G, Kang Y M, Han G D, Sakurai K. Effect of climate change over the past half century on the distribution, extent and NPP of ecosystems of Inner Mongolia. *Global Change Biology*, 2011, 17(1): 377-389.
- [ 5 ] 于贵瑞, 方华军, 伏玉玲, 王秋风. 区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展. *生态学报*, 2011, 31(19): 5449-5459.
- [ 6 ] Coverdale T C, Herrmann N C, Altieri A H, Bertness M D. Latent impacts: the role of historical human activity in coastal habitat loss. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2013, 11(2): 69-74.

- [ 7 ] Restrepo A, Colinvaux P, Bush M, Correa-Metrio A, Conroy J, Gardener M R, Jaramillo P, Steinitz-Kannan M, Overpeck J. Impacts of climate variability and human colonization on the vegetation of the Galápagos Islands. *Ecology*, 2012, 93(8): 1853-1866.
- [ 8 ] Wackernagel M, Rees W E. *Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth*. Philadelphia, PA and Gabriola Island, B.C., Canada: New Society Publishers, 2013.
- [ 9 ] Peñuelas J, Sardans J, Rivas-ubach A, Janssens I A. The human-induced imbalance between C, N and P in Earth's life system. *Global Change Biology*, 2012, 18(1): 3-6.
- [ 10 ] 易浪, 任志远, 张翀, 刘雯. 黄土高原植被覆盖变化与气候和人类活动的关系. *资源科学*, 2014, 36(1): 166-174.
- [ 11 ] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environments*, 2004, 57(4): 535-554.
- [ 12 ] Weng Q H. Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies; Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, 64(4): 335-344.
- [ 13 ] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 裴亮. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析. *地理学报*, 2012, 67(5): 589-598.
- [ 14 ] Symeonakis E, Drake N. Monitoring desertification and land degradation over sub-Saharan Africa. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(3): 573-592.
- [ 15 ] 彭飞, 王涛, 薛娴. 基于 RUE 的人类活动对沙漠化地区植被影响研究——以科尔沁地区为例. *中国沙漠*, 2010, 30(4): 896-902.
- [ 16 ] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 基于植被降水利用效率和 NDVI 的黄河上游地区生态退化研究. *生态学报*, 2012, 32(11): 3404-3413.
- [ 17 ] Li H X, Liu G H, Fu B J. Spatial variations of rain-use efficiency along a climate gradient on the Tibetan Plateau: A satellite-based analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(21): 7487-7503.
- [ 18 ] 田汉勤, 刘明亮, 张弛, 任巍, 徐小锋, 陈广生, 吕超群, 陶波. 全球变化与陆地系统综合集成模拟——新一代陆地生态系统动态模型 (DLEM). *地理学报*, 2010, 65(9): 1027-1047.
- [ 19 ] Albertson J D, Katul G G, Wiberg P. Relative importance of local and regional controls on coupled water, carbon, and energy fluxes. *Advances in Water Resources*, 2001, 24(9/10): 1103-1118.
- [ 20 ] Ren W, Tian H Q, Tao B, Huang Y, Pan S F. China's crop productivity and soil carbon storage as influenced by multifactor global change. *Global Change Biology*, 2012, 18(9): 2945-2957.
- [ 21 ] Zhou W, Gang C C, Zhou F C, Li J L, Dong X G, Zhao C Z. Quantitative assessment of the individual contribution of climate and human factors to desertification in northwest China using net primary productivity as an indicator. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 560-569.
- [ 22 ] 胡志斌, 何兴元, 李月辉, 朱教君, 李小玉. 岷江上游地区人类活动强度及其特征. *生态学杂志*, 2007, 26(4): 539-543.
- [ 23 ] 陈忠升, 陈亚宁, 李卫红, 陈亚鹏. 塔里木河干流径流损耗及其人类活动影响强度变化. *地理学报*, 2011, 66(1): 89-98.
- [ 24 ] 罗玲, 王宗明, 毛德华, 娄艳景, 任春颖, 宋开山. 松嫩平原西部草地净初级生产力对气候变化及人类活动的响应. *生态学杂志*, 2012, 31(6): 1533-1540.
- [ 25 ] Su C H, Fu B J, He C S, Lü Y H. Variation of ecosystem services and human activities: A case study in the Yanhe Watershed of China. *Acta Oecologica*, 2012, 44: 46-57.
- [ 26 ] 王琪, 史基安, 张中宁, 孟自芳. 石羊河流域环境现状及其演化趋势分析. *中国沙漠*, 2003, 23(1): 46-52.
- [ 27 ] 王兴成, 王开录. 石羊河流域生态环境恶化原因及综合防治思路与措施. *水土保持研究*, 2004, 11(1): 174-176.
- [ 28 ] 常兆丰, 韩福贵, 仲生年, 赵明, 梁泰. 石羊河下游沙漠化的自然因素和人为因素及其位移. *干旱区地理*, 2005, 28(2): 150-155.
- [ 29 ] 张永明, 宋孝玉, 沈冰, 沈清林, 张晓伟. 石羊河流域水资源与生态环境变化及其对策研究. *干旱区地理*, 2007, 29(6): 838-843.
- [ 30 ] 郭承录, 李发明. 石羊河流域生态系统存在的问题及治理对策. *中国沙漠*, 2010, 30(3): 608-613.
- [ 31 ] 李传华, 赵军. 2000-2010 年石羊河流域 NPP 时空变化及驱动因子. *生态学杂志*, 2013, 32(3): 712-718.
- [ 32 ] 文星, 王涛, 薛娴, 段翰晨, 廖杰. 1975—2010 年石羊河流域绿洲时空演变研究. *中国沙漠*, 2013, 33(2): 478-485.
- [ 33 ] 杨东. 关于深入推进石羊河流域后期治理的思考. *中国水利*, 2012, (17): 21-22.
- [ 34 ] 陈志恺. 石羊河的治理经验值得总结推广. *中国水利*, 2013, (5): 15-15.
- [ 35 ] Liu C M, Zhang D, Liu X M, Zhao C S. Spatial and temporal change in the potential evapotranspiration sensitivity to meteorological factors in China (1960—2007). *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(1): 3-14.
- [ 36 ] Yin Y H, Wu S H, Dai E F. Determining factors in potential evapotranspiration changes over China in the period 1971-2008. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(29): 3329-3337.
- [ 37 ] 刘普幸, 卓玛兰草. 甘肃省 1960-2008 年潜在蒸散量时空变化及其影响因子. *自然资源学报*, 2012, 27(9): 1561-1571.
- [ 38 ] 周广胜, 张新时. 自然植被净第一性生产力模型初探. *植物生态学报*, 1995, 19(3): 193-200.
- [ 39 ] 石培基, 王祖静, 刘春芳. 石羊河流域土地覆被空间演化及驱动机制. *生态学报*, 2014, 34(15): 4361-4371.
- [ 40 ] 祁威, 张懿铨, 高俊刚, 杨续超, 刘林山, Khanal N R. 1971-2009 年珠穆朗玛峰地区尼泊尔境内气候变化. *地理学报*, 2013, 68(1): 82-94.