

武磊,李常斌,王刘明,等.基于ESA-LUC和MODIS-NDVI的西北干旱荒漠-绿洲体系分类阈值及应用[J].中国沙漠,2020,40(6):139-150.

# 基于ESA-LUC和MODIS-NDVI的西北干旱荒漠-绿洲体系分类阈值及应用

武磊,李常斌,王刘明,谢旭红,张媛,魏健美

(兰州大学 资源环境学院/西部环境教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**选择ESA-LUC和MODIS NDVI数据,通过两套数据的逐像元对比,实现基于NDVI的荒漠-绿洲阈值率定,在此基础上形成绿洲植被、荒漠植被和荒漠等大类。绿洲属外源水资源支撑类,具较高植被生产力;荒漠植被属本地降水支撑类,属过渡型植被生产力;荒漠类包括沙漠、岩漠、砾漠等未利用类型,以绿度极低或无植被为主要特征。结果表明:NDVI阈值与参照覆被的构成密切相关,受研究区水文气象、基质类型及绿洲开发程度等影响,分类阈值构成也不尽相同。将率定所得阈值应用于4个代表性流域荒漠-绿洲体系的划分及植被演变研究,发现各研究区植被动态与绿洲扩张、区域水资源变化和荒漠本底占比等形成良好空间对应;稳定区以绿洲更绿、荒漠更荒为主要变化特征;变化高值区主要分布在绿洲外围地带,反映了农业扩张、轮作或弃耕等人为因素;荒漠腹地的植被变化幅度较小,与该区植被主要受本地降水支撑和调节有关。研究为干旱荒漠-绿洲体系划分提供了一种简单实用的数据方法,相关结论可为干旱区水土资源的合理规划利用及荒漠生态保护、改良提供基本数据支撑。

**关键词:** 绿洲植被; 荒漠植被; 荒漠; ESA-LUC; MODIS-NDVI

**文章编号:** 1000-694X(2020)06-139-12

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00037

**中图分类号:** TP79

**文献标志码:** A

## 0 引言

土地利用/覆被变化(LUCC)是气候变化和人类活动对地球表面进行改造最直观的体现,更是各种生命形式、特别是人类经济-社会-生态体系存在、演替和可持续发展的纽带<sup>[1]</sup>。受自然和人类活动双重影响,LUCC存在多种地类在不同时空尺度的复杂交替和转化的总体特征,其动态演变对气候、水文、土壤等环境过程形成反馈,进而对人类的生存与发展产生影响。半个多世纪以来,科技进步提升了人们改造土地的能力,在人口和经济发展内在需求的推动下,土地资源开发的广度和强度堪称空前,其中存在的不合理和无节制,造成一系列重大环境问题<sup>[2-3]</sup>。诸多科学研究计划把LUCC列为全球变化研究领域的基础性和关键内容<sup>[4]</sup>。

绿洲是干旱平原地带荒漠基质背景上以小尺度范围镶嵌的、具有一定生产力的、能够维持相对

稳定的和具有明显水文气候异质性效应的生态景观。作为干旱区人类生存和发展的主要场所,绿洲的存续和稳定对经济-社会-生态复合体系的健康和谐<sup>[5]</sup>具有重要意义<sup>[6-7]</sup>。干旱平原地带降水稀少,难以有效支撑绿洲生态,绿洲的稳定维持须靠出山径流、跨域调水、河湖渠田入渗等外源型水资源支撑。反过来,绿洲变化是干旱区天然-人工二元水文体系变化的主要驱动因素<sup>[8-10]</sup>。基于上述理解,进行干旱区荒漠-绿洲体系土地利用/覆被(LUC)类型划分,于旱区水资源生态承载力评估、生态水资源耗用及水资源合理规划利用等,具有重要意义<sup>[11]</sup>。

LUC的数据来源有基于地面调查的植被专题、遥感解译及其成果/产品的综合等。其中,归一化植被指数(NDVI)是反映植被长势和营养信息的重要生态学指标,有利于绿色植被区和非植被基质背景的甄别,在区域生态环境演化评估等领域应用良

收稿日期:2019-09-06; 改回日期:2020-04-28

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504306,2017YFC0504801);国家自然科学基金项目(41671017)

作者简介:武磊(1994—),男,山西晋中人,博士研究生,主要从事水环境遥感研究。E-mail: wul17@lzu.edu.cn

通信作者:李常斌(E-mail: licb@lzu.edu.cn)

好<sup>[12]</sup>,如基于NDVI的干旱区内陆河中下游绿洲时空演替<sup>[13]</sup>、绿洲化和荒漠化<sup>[14-15]</sup>以及基于绿度-温度空间特征进行土地覆被和作物分类等研究<sup>[16-17]</sup>。这些研究为生态学指标应用于LUCC研究提供了很好的范例,总体属于单个指标用于资源环境变迁研究。干旱平原地带因承接的水分来源不同,植被生长发生景观分异,基于LUC类型与生态学指标如NDVI之间的关联,有助于人们耦合地类和绿度两个指标体系去理解或量化资源环境及其过程,相关研究少见报道。鉴于此,本文选用公开发布的LUC和NDVI产品,通过逐像元对比率定NDVI阈值,就西北干旱区4个典型流域中下游平原荒漠-绿洲体系动态进行综合研究,工作属于多源数据综合应用的范例,成果可为干旱荒漠-绿洲体系水资源耗用研究提供基础数据支撑。

## 1 研究区概况

研究区位于中国西北内陆河流域的中下游平

原地区,地理位置 $34^{\circ}54'—49^{\circ}19'N$ 、 $73^{\circ}44'—106^{\circ}46'E$ ,包括甘肃河西走廊、新疆和内蒙古西部的广大地带(图1)。域内气候干旱,降水稀少,蒸发能力巨大,河湖岸阶和地下水浅埋区以外“非灌不植”,绿洲主要靠外源型水资源——出山径流支撑<sup>[18]</sup>,荒漠区植物生产力低下,一般植被和作物难以维持正常生长。研究区地处欧亚大陆腹地,远离海洋,总体属温带大陆性干旱气候。因地域广大,且东、南、西北部三面环山,外部环流输入分异明显,气温和降水的分布具一定的梯度效应,导致西北干旱荒漠-绿洲区气候要素的空间分异特征明显。多年平均气温 $-4.3\sim 14.7^{\circ}C$ ,山区低,平原区高;多年平均降水 $15.6\sim 510.6\text{ mm}$ ,山区较丰,平原区稀少。总体而言,西北干旱区气温高,降水稀少,域内沙漠戈壁广布,生态系统呈基质性脆弱。选择石羊河、黑河、玛纳斯河和阿克苏河流域中下游平原区为代表区域,前两者主要位于甘肃河西,玛纳斯属北疆,阿克苏属南疆。流域概况见表1。

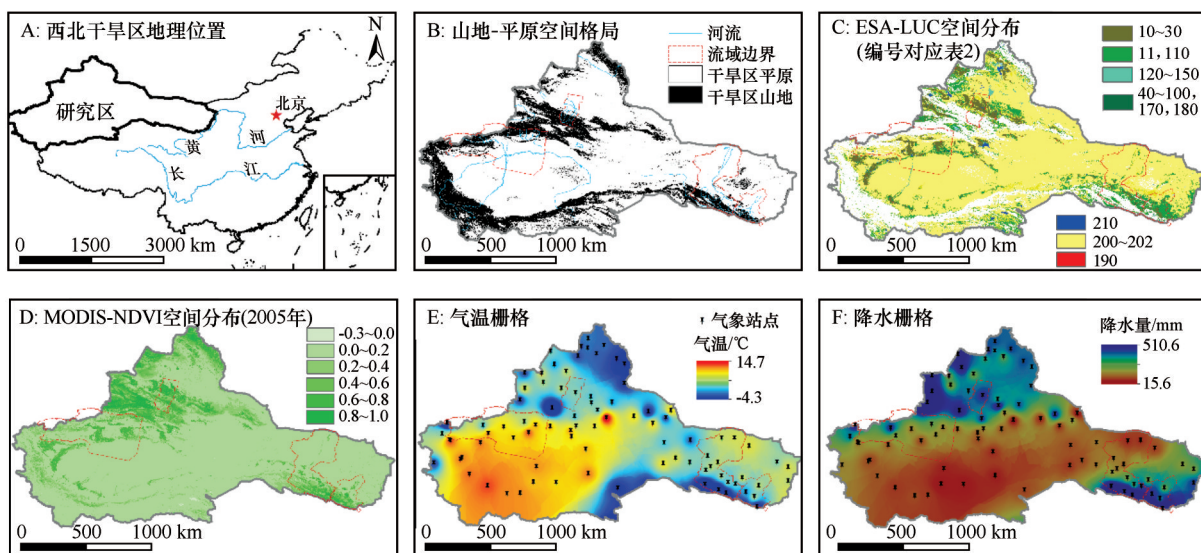


图1 西北干旱区地理位置及相关要素空间分布

Fig.1 Location map of the arid northwestern China combined with spatial distributions of various factors (A.location map; B. spatial pattern of mountain-plain systems; C. ESP-LUC; D. MODIS-NDVI; E. air temperature; F. precipitation)

## 2 数据与方法

### 2.1 数据来源及处理

选用欧洲航天局(ESA)发布的LUC数据(ESA-LUC, <http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/>)和NASA基于中分辨率成像光谱仪(MODIS)的MODIS-NDVI产品(MOD13Q1, [https://ladsweb.modaps.eosdis.](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD13A2-6)

[nasa.gov/search/order/1/MOD13A2-6](https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/order/1/MOD13A2-6))用于研究。ESA-LUC为300 m分辨率的年序列数据(1992—2015年);NDVI为250 m分辨率的16 d融合产品,采用最大值合成法得到年最大NDVI序列(2001—2015年),以2001—2015年为研究时段,两套数据重采样统一为300 m空间分辨率,便于逐像元叠置分析。

基于ESA-LUC类型,逐像元统计MODIS-NDVI值。西北干旱内陆河流域中下游平原区的ESA-

表 1 流域概况

Table 1 Summary of the four selected representative basins

| 项目                      | 流域                      |                                       |                      |                             |
|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|----------------------|-----------------------------|
|                         | 石羊河                     | 黑河                                    | 玛纳斯河                 | 阿克苏河                        |
| 支流名称(自东向西)              | 大靖、古浪、黄羊、杂木、金塔、西营、东大、西大 | 童子坝、大都麻、洪水河、民乐、大野口、山丹、梨园、洪水坝、马营、丰乐、讨赖 | 塔西、玛纳斯、宁家、金沟、大南沟、巴音沟 | 托什干、昆马力克、苛苛牙尔、台兰、克奇阿肯、喀拉玉尔滚 |
| 总面积/万 km <sup>2</sup>   | 4.16                    | 14.29                                 | 2.67                 | 17.06                       |
| 山区面积/万 km <sup>2</sup>  | 1.01                    | 2.79                                  | 0.90                 | 4.26                        |
| 出山径流总量/亿 m <sup>3</sup> | 15.6                    | 37.55                                 | 11.00~13.00          | 32.70                       |
| 平原区面积/万 km <sup>2</sup> | 3.15                    | 11.50                                 | 1.77                 | 12.80                       |
| 行政隶属                    | 甘肃                      | 青海、甘肃、内蒙古                             | 新疆                   | 新疆                          |
| 人口/万人                   | 230                     | 146                                   | 87                   | 162                         |
| 耕地面积/万 hm <sup>2</sup>  | 37.12                   | 38.40                                 | 27.33                | 56.70                       |
| 年均气温/℃                  | 6.24                    | 7.03                                  | 6.36                 | 9.84                        |
| 年降水量/mm                 | 232.22                  | 113.59                                | 175.19               | 110.00                      |

经济社会数据为 2015 年;水文气象数据为 1998—2016 年平均值。

LUC 体系包含 25 种地类。以 2005 年为例,绝大多数地类对应 MODIS-NDVI 值域范围较大,如代码为“20”的灌溉农田,NDVI 介于 0.02~0.99,从植被生产力角度,太低的 NDVI(年最大值)不符合实际;再如,旱生半灌、矮灌或稀疏灌丛、草地等地类,一般具有较低的 NDVI 值,以代码为“120”的灌丛为例,尽管该地类 NDVI 均值只有 0.19,值域 0~0.91。统计显示,代码为 20 的灌溉农田,其 NDVI 值在 0.4 以上的栅格占比 90%;代码为 120 的灌丛,其 NDVI 值在 0.4 以下栅格占比 97%,分别对应灌溉农田的 NDVI 高值和旱生稀疏灌丛的 NDVI 低值,表明 ESA-LUC 体系关于地类的解译总体较好,但存在一定程度的不确定性,该情形可结合 NDVI 值和 ESA-LUC 型的逐项元对照,通过阈值率定及其应用得以改善。经逐像元统计,ESA-LUC 体系中,代码为 72、120、122、130、140 和 150 的地类,属于 NDVI 低值类,对应生产力低的植被型,将这些地类聚类为“荒漠植被”;200、201 和 202 被 ESA 定义为裸地,对应沙漠、戈壁(砾漠)、盐漠等地类,将这些地类聚类为“荒漠”。上述荒漠体系生产力低的地类,在表 2 中以黑体显示,其余地类聚类为“绿洲”,水域和城镇面积占比小,不计入。

2.2 研究方法

2.2.1 荒漠-绿洲体系划分阈值

基于表 2 的聚类,以 0.02 为值阶,统计基于

ESA-LUC 聚类的绿洲植被、荒漠植被和荒漠所对应的 NDVI 值,计算不同值域 NDVI 所对应的 ESA-LUC 的面积百分比,以此反映基于阈值 NDVI 反演绿洲植被、荒漠植被和荒漠的精度,最终得出适宜西北干旱区 4 个代表性区域荒漠-绿洲体系划分阈值。

概念上,型是针对 LUC 结构和类型的说明,值是型的具体度量(如 NDVI 值)。图 2 为以西北干旱平原区为例的不同地类对应的 NDVI 分布曲线,按 NDVI 所能解释的 ESA-LUC 面积百分比确定其分类阈值。以绿洲植被为例,ESA-LUC 体系的绿洲植被类(表 2)对应的 NDVI 介于 0~1,涵盖全部值域,因分析采用 NDVI 年最大值,NDVI 值过小与绿洲植被的较高生产力不相匹配。随着 NDVI 取值的增大,将一部分较低绿度的绿洲植被排除在外,其所能解释的绿洲植被的保证率开始下降。以 NDVI≥0.4 为例,该阈值能解释的 ESA-LUC 的绿洲植被占比 80%,由于 NDVI 高值基本不对应“荒漠”型,意味着 ESA-LUC 中,有 20%的“绿洲”被划分为“荒漠植被”类。就荒漠类而言,NDVI≤0.28 时几乎能解释所有“Bare Lands”。由表 2 最大值统计结果可知,荒漠类 NDVI 值大于 0.28 的栅格占比小于 1%,可以忽略,但 0.28 远高于“荒漠”类的均值(0.1 以下),以该值为阈值,存在把一些 NDVI 较低但为“荒漠植被”类型的部分错划到“荒漠”的风险。鉴于以上,干旱

表2 中国西北干旱区 ESA-LUC 体系及 MODIS-NDVI 对应统计(2005 年)  
Table 2 Statistics of ESA-LUC system corresponding to MODIS-NDVI in the arid northwestern China (2005)

| 序号 | ESA-LUC    |                                  |              | MODIS-NDVI   |             |             |
|----|------------|----------------------------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
|    | 代码         | 类型                               |              | 最小值          | 最大值         | 平均值         |
| 1  | 10         | Cropland-Rainfed                 | 旱作农田         | 0.05         | 0.96        | 0.61        |
| 2  | 11         | Herbaceous cover                 | 禾本科草地        | 0.03         | 0.96        | 0.46        |
| 3  | 20         | Cropland-Irrigated               | 灌溉农田         | 0.02         | 0.99        | 0.62        |
| 4  | 30         | Mosaic cropland/tree             | 农林混交         | 0.05         | 0.96        | 0.49        |
| 5  | 40         | Mosaic vegetation/tree           | 人工林地         | 0.00         | 0.98        | 0.45        |
| 6  | 60         | Tree cover                       | 林地           | 0.37         | 0.92        | 0.81        |
| 7  | 61         | Tree cover                       |              | 0.44         | 0.90        | 0.74        |
| 8  | 70         | Tree cover                       |              | 0.00         | 0.97        | 0.78        |
| 9  | 72         | Tree cover                       |              | <b>0.00</b>  | <b>0.02</b> | <b>0.01</b> |
| 10 | 80         | Tree cover                       |              | 0.02         | 1.00        | 0.74        |
| 11 | 90         | Tree cover                       |              | 0.74         | 0.91        | 0.85        |
| 12 | 100        | Mosaic tree/shrub/herbaceous     | 林灌草          | 0.00         | 0.98        | 0.68        |
| 13 | 110        | Mosaic herbaceous/tree/shrub     | 草林灌          | 0.00         | 0.99        | 0.72        |
| 14 | <b>120</b> | <b>Shrubland</b>                 | <b>灌丛</b>    | <b>0.00</b>  | <b>0.91</b> | <b>0.19</b> |
| 15 | <b>122</b> | <b>Shrubland deciduous</b>       | <b>落叶灌丛</b>  | <b>0.02</b>  | <b>0.70</b> | <b>0.14</b> |
| 16 | <b>130</b> | <b>Grassland</b>                 | <b>草地</b>    | <b>-0.09</b> | <b>1.00</b> | <b>0.26</b> |
| 17 | <b>140</b> | <b>Lichens and mosses</b>        | <b>地衣苔藓</b>  | <b>0.02</b>  | <b>0.49</b> | <b>0.14</b> |
| 18 | <b>150</b> | <b>Sparse vegetation</b>         | <b>稀疏草</b>   | <b>-0.03</b> | <b>0.90</b> | <b>0.21</b> |
| 19 | 170        | Tree cover                       | 树林植被         | 0.65         | 0.84        | 0.75        |
| 20 | 180        | Shrub or herbaceous cover        | 灌&禾本科        | -0.06        | 0.99        | 0.55        |
| 21 | 190        | Urban areas                      | 城镇           | 0.01         | 0.90        | 0.41        |
| 22 | <b>200</b> | <b>Bare areas</b>                | <b>裸地</b>    | <b>-0.05</b> | <b>0.99</b> | <b>0.10</b> |
| 23 | <b>201</b> | <b>Consolidated bare areas</b>   | <b>固定裸地</b>  | <b>-0.02</b> | <b>0.86</b> | <b>0.08</b> |
| 24 | <b>202</b> | <b>Unconsolidated bare areas</b> | <b>非固定裸地</b> | <b>-0.02</b> | <b>0.67</b> | <b>0.08</b> |
| 25 | 210        | Water bodies                     | 水域           | -0.30        | 0.99        | 0.23        |

黑体表示荒漠体系生产力低的地类。

区荒漠-绿洲体系的划分,荒漠和荒漠植被以及后者与绿洲之间的阈值是关键。

采用上述方法,按时阶选择3个代表性年份,以2005、2015年为率定年求平均,以2010年为验证年,对4个典型流域绿洲-荒漠体系的划分阈值及其精度进行计算和评估。以上工作基于ESA-LUC和MODIS-NDVI栅格叠置后的逐类对照,若考虑ESA-LUC体系的可能误差,前述NDVI阈值的应用,基于简单滤波消除了高生产力覆被类型中的“低NDVI值”和低生产力覆被类型中的“高NDVI

值”,更接近绿度表征的植被覆盖状况,有利于夯实干旱区荒漠-绿洲变化分析的数据基础。

2.2.2 植被动态度

包括单一植被动态度和综合植被动态度,二者均可表示时段内植被变化的速率,有利于不同植被类型变化在区域之间的差异性对比<sup>[4]</sup>。单一动态度表示某一植被类型在时段内的变化程度,值的正负表示该植被在时段内的扩张或萎缩,绝对值的大小则表示扩张或萎缩的强度;综合动态度为全部植被的总变化量与土地总面积的比值,用以测算区域

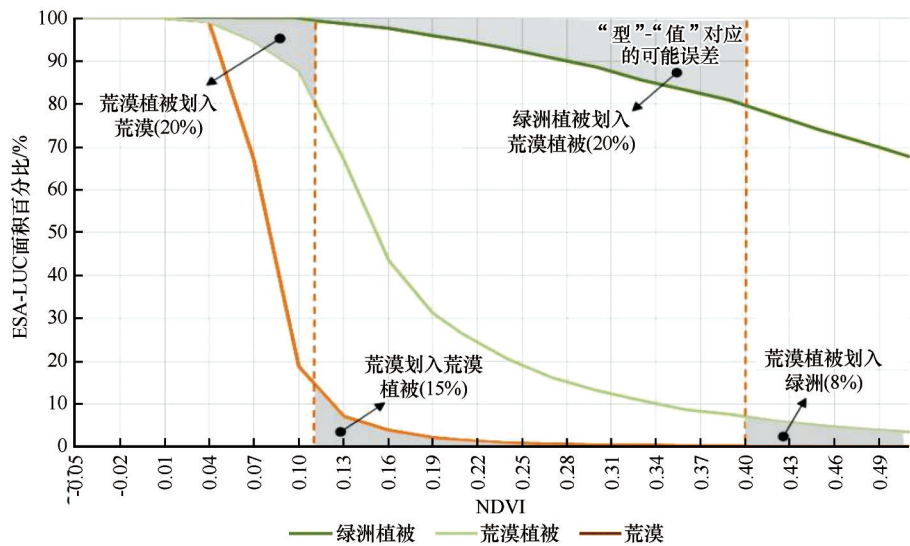


图2 荒漠-绿洲体系“型-值”对应的概念框架及其可能的“误差”归属

Fig.2 Conceptual framework of the "Type-Value" correspondance for reclassification of desert-oasis system along with the distribution of possible errors

LUCC 的总体活跃程度。公式分别为：

$$D_s = \frac{(A'_k - A_k)}{A_k} \times \left(\frac{1}{T}\right) \times 100\% \tag{1}$$

$$D_g = \frac{\sum_{k=1}^n \Delta A_k}{2 \sum_{k=1}^n A_k} \times \frac{1}{T} \times 100\% \tag{2}$$

式中： $D_s$ 、 $D_g$  分别表示单一植被动态度和综合植被动态度； $A_k$ 、 $A'_k$  表示研究时段始、末植被  $k$  的面积； $\Delta A_k$  表示研究时段内植被  $k$  的面积变化量； $T$  表示时间，单位为年。

2.2.3 Sen 斜率

Sen 斜率 (Sen's Slope, SS) 在评估时间序列的变化趋势及变化幅度 (即变化速率) 时, 能降低或避免数据异常及缺失对分析结果的影响, 是一种较为成熟的变化幅度统计方法<sup>[19-22]</sup>。以样本序列在可以构成的每一长度下的变化率构造秩序列, 根据给定显著性水平进行统计变量 (SS) 检验, 得到变化率取值范围, 进而以中值大小判断序列的变化趋势及幅度。SS 绝对值代表序列变化幅度, 正负代表变化趋势;  $SS > 0$ , 序列呈上升趋势;  $SS < 0$  时, 序列呈下降趋势。计算公式为<sup>[23]</sup>:

$$SS_{ij} = MEDIAN \frac{(X_j - X_i)}{(j - i)} \tag{3}$$

式中:  $SS_{ij}$  为 Sen 斜率值;  $X_i$  和  $Y_i$  分别为第  $i$  时刻和第  $j$  时刻的序列值, 其中  $1 < i < j < n$ ,  $n$  为序列长度。

3 结果与分析

3.1 荒漠-绿洲体系划分阈值

基于上述方法得到适用于西北干旱区 4 个典型流域的荒漠-绿洲体系分类阈值 (表 3)。4 个流域不同地类划分阈值存在一定差异, 石羊河流域绿洲-荒漠阈值最大 (0.48), 而荒漠植被-荒漠的阈值以玛纳斯河最大 (0.22)。对不同区域阈值进行验证 (图 3)。误差以阿克苏河流域最大 (13%), 其余各流域均保持在 10% 以内, 特别是绿洲划分结果与 ESA-LUC 的契合度最高, 误差不超过 5%。本次工作的分类结果与前人研究<sup>[24-27]</sup> 的分类体系相近, 从侧面反映出所设计分类方案和分类阈值率定方法的合理性, 可作为干旱荒漠-绿洲体系稳定性评价及生态水资源耗用等工作的基础。

表 3 基于 NDVI 的荒漠-绿洲体系划分阈值

Table 3 NDVI thresholds for reclassification of the desert-oasis systems

| 分区     | 绿洲-荒漠植被 | 荒漠植被-荒漠 |
|--------|---------|---------|
| 石羊河流域  | 0.48    | 0.12    |
| 黑河流域   | 0.45    | 0.12    |
| 玛纳斯河流域 | 0.44    | 0.22    |
| 阿克苏河流域 | 0.43    | 0.15    |
| 西北干旱区  | 0.40    | 0.11    |

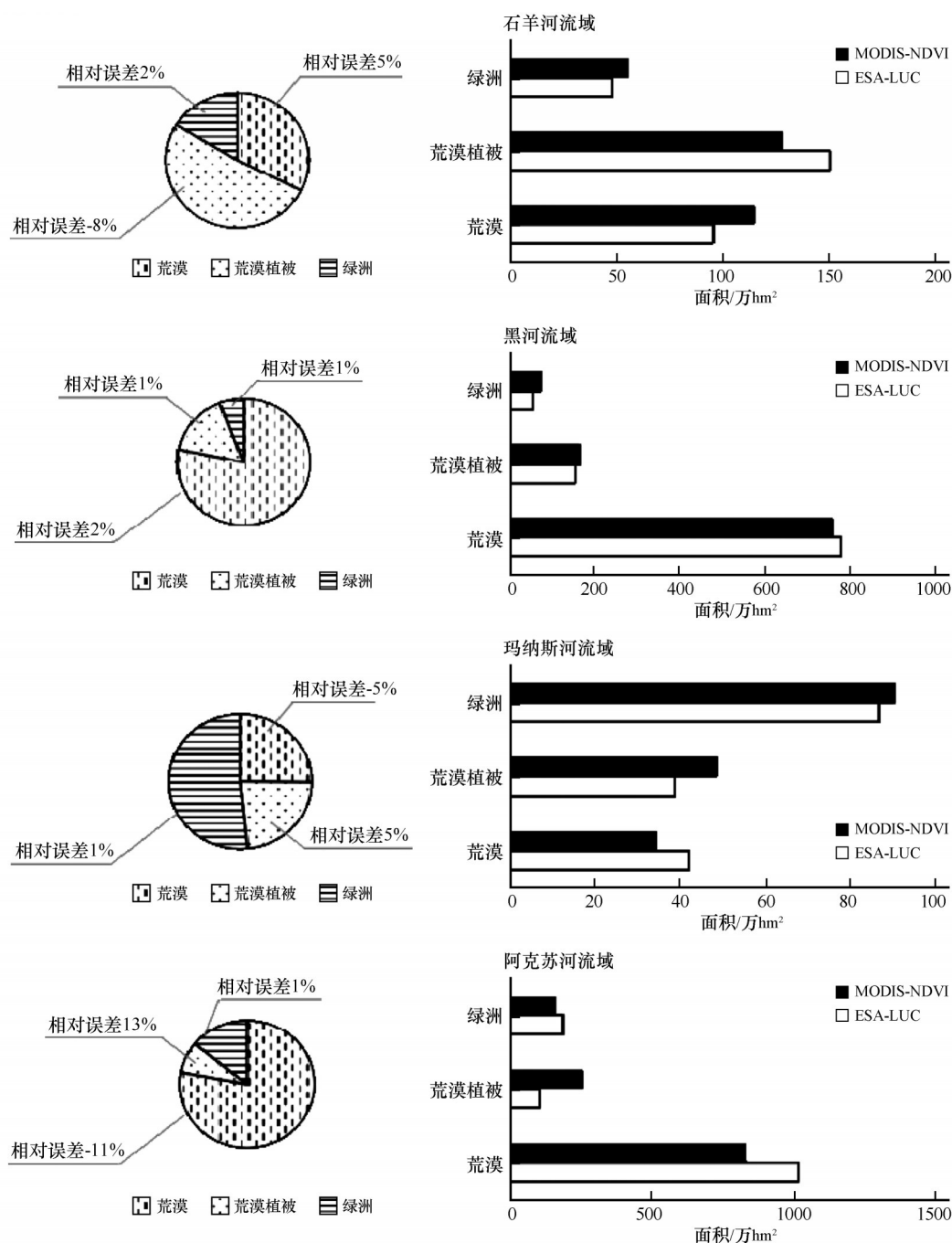


图3 荒漠-绿洲体系分类阈值精度验证

Fig.3 Precision assessment of the reclassification thresholds for the desert-oasis systems

### 3.2 荒漠-绿洲体系变化及动态

基于所率定阈值,就2001—2015年西北干旱区4个代表性区域3种覆被类型变化趋势及动态度进行量化分析。

#### 3.2.1 变化趋势

4区分属石羊河、黑河、玛纳斯河和阿克苏河流域的中下游平原区。因出山径流来源、数量和流长各异,所涵养绿洲规模不等。总体来看,石羊河流

域绿洲植被面积最小,玛纳斯流域荒漠面积最小,阿克苏河流域两者面积均为最大。2001—2015年,4区绿洲、荒漠植被和荒漠变化各具特点,以玛纳斯河绿洲增加和黑河、阿克苏河流域的荒漠减少最为明显(图4)。

#### 3.2.2 植被动态度

基于阈值分类,按2001—2005、2006—2010、2011—2015年分期就西北干旱区全域和4个代表区

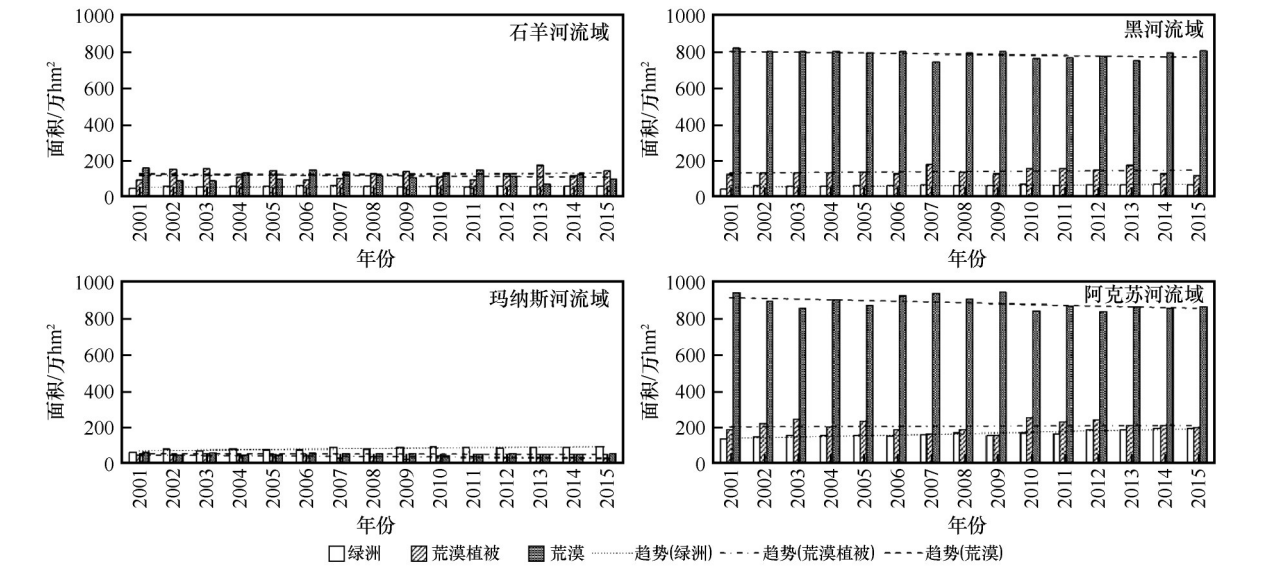


图4 荒漠-绿洲体系覆被变化趋势(2001—2015年)

Fig.4 LUC variation trends in the desert-oasis systems of the four representative regions(2001—2015)

的覆被动态度进行计算,以3期动态度平均值为代表进行全期分析(表3)。统计期间,石羊河、黑河和阿克苏河流域绿洲和荒漠植被均有所增加,与之对应的是荒漠面积的减少;玛纳斯河流域绿洲扩张明显,荒漠植被和荒漠面积同时发生减少。总体来看,西北内陆河流域中下游地区以绿洲、荒漠植被增加和荒漠减少为主要特征。从植被的综合动态度(表3)来看,石羊河、玛纳斯河流域地类转移活跃度较高,黑河和阿克苏河流域相对较低、比较接近但高于西北干旱区全域。土地利用动态度依变化面积和初始面积的比值进行计算,绿洲的单一动态度值较大,与绿洲本底值积较小有关;综合动态度在石羊河和玛纳斯河流域有较大的值,与区内荒漠面积占比较小和绿洲开发程度较高有关。

| 表3 西北干旱区及其4个代表性区域的植被动态度<br>(2001—2015年)                                                         |      |           |          |            |            |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------|----------|------------|------------|-----------|
| Table 3 Vegetation dynamics in the arid NWC and the<br>four representative areas (2001 to 2015) |      |           |          |            |            |           |
| 动态类型                                                                                            | 植被类型 | 区域        |          |            |            |           |
|                                                                                                 |      | 石羊河<br>流域 | 黑河<br>流域 | 玛纳斯<br>河流域 | 阿克苏<br>河流域 | 西北干<br>旱区 |
| 单一<br>动态度                                                                                       | 绿洲植被 | 2.03      | 3.49     | 2.86       | 2.88       | 2.15      |
|                                                                                                 | 荒漠植被 | 8.08      | 0.58     | -0.44      | 3.17       | 1.56      |
|                                                                                                 | 荒漠   | -5.52     | -0.25    | -3.20      | -1.07      | 1.15      |
| 综合<br>动态度                                                                                       |      | 2.90      | 0.73     | 1.62       | 0.94       | 0.74      |

3.3 NDVI动态指征的绿洲-荒漠演变

3.3.1 总体特征

依统计显著性( $P\leq0.05$ )就Sen斜率计算结果进行分类。石羊河、黑河、玛纳斯河流域中下游平原区荒漠-绿洲体系绿度增加区( $SS>0$ )面积大于降低区( $SS<0$ ),阿克苏河流域呈相反情形(表4)。西北干旱区全域而言,绿度增区面积占比小于绿度降区,与绿洲和荒漠植被以及荒漠等三大类地的绝对面积大小有关。总体来看,82%的区域无变化或变化不显著,一定程度反映出西北干旱区荒漠-绿洲体系荒漠基质总体表现为稳定。

表4 基于显著性的绿度升降面积占比(%)

Table 4 Areal proportions based on statistical significance and Sen's slope tested NDVI variations (%)

| 统计区    | $P\leq0.05$ |      | $P>0.05$ |
|--------|-------------|------|----------|
|        | SS>0        | SS<0 | 不显著      |
| 石羊河流域  | 13          | 7    | 80       |
| 黑河流域   | 26          | 12   | 62       |
| 玛纳斯河流域 | 33          | 11   | 56       |
| 阿克苏河流域 | 11          | 17   | 72       |
| 西北干旱区  | 8           | 10   | 82       |

3.3.2 稳定区和变化区

基于NDVI阈值应用,将各期地类栅格进行叠置,以此确定统计期内地类发生转移的变化区和地类始终不变的稳定区(表5)。4个代表区中,稳定区

表5 稳定区和变化区面积(万  $\text{hm}^2$ )Table 5 Areal statistics of the stable and the unstable regions ( $10^4 \text{ hm}^2$ )

| 植被稳定性 | 植被类型 | 区域       |          |         |          |
|-------|------|----------|----------|---------|----------|
|       |      | 石羊河流域    | 黑河流域     | 玛纳斯河流域  | 阿克苏河流域   |
| 稳定区   | 绿洲植被 | 34(11%)  | 42(4%)   | 52(31%) | 107(9%)  |
|       | 荒漠植被 | 42(14%)  | 58(6%)   | 4(2%)   | 48(3%)   |
|       | 荒漠   | 43(14%)  | 662(66%) | 32(18%) | 690(55%) |
| 变化区   |      | 180(60%) | 240(24%) | 85(49%) | 409(33%) |

面积以黑河流域和阿克苏河流域居多,其中又以荒漠类面积占比最大,分别占流域内平原区总面积的66%和55%。石羊河和玛纳斯河稳定区中荒漠面积占比较小,分别为14%和18%;变化区面积占比较大,分别为60%和49%。绿洲稳定区以玛纳斯河流域占

比最高,为31%;黑河最低,仅占平原区面积的4%。

### 3.3.3 稳定区特征

基于Sen斜率空间统计,将 $P \leq 0.05$ 区域按SS值大小成图(图5)。统计期间,石羊河流域武威南部绿洲和荒漠植被稳定区NDVI呈下降趋势,古浪以

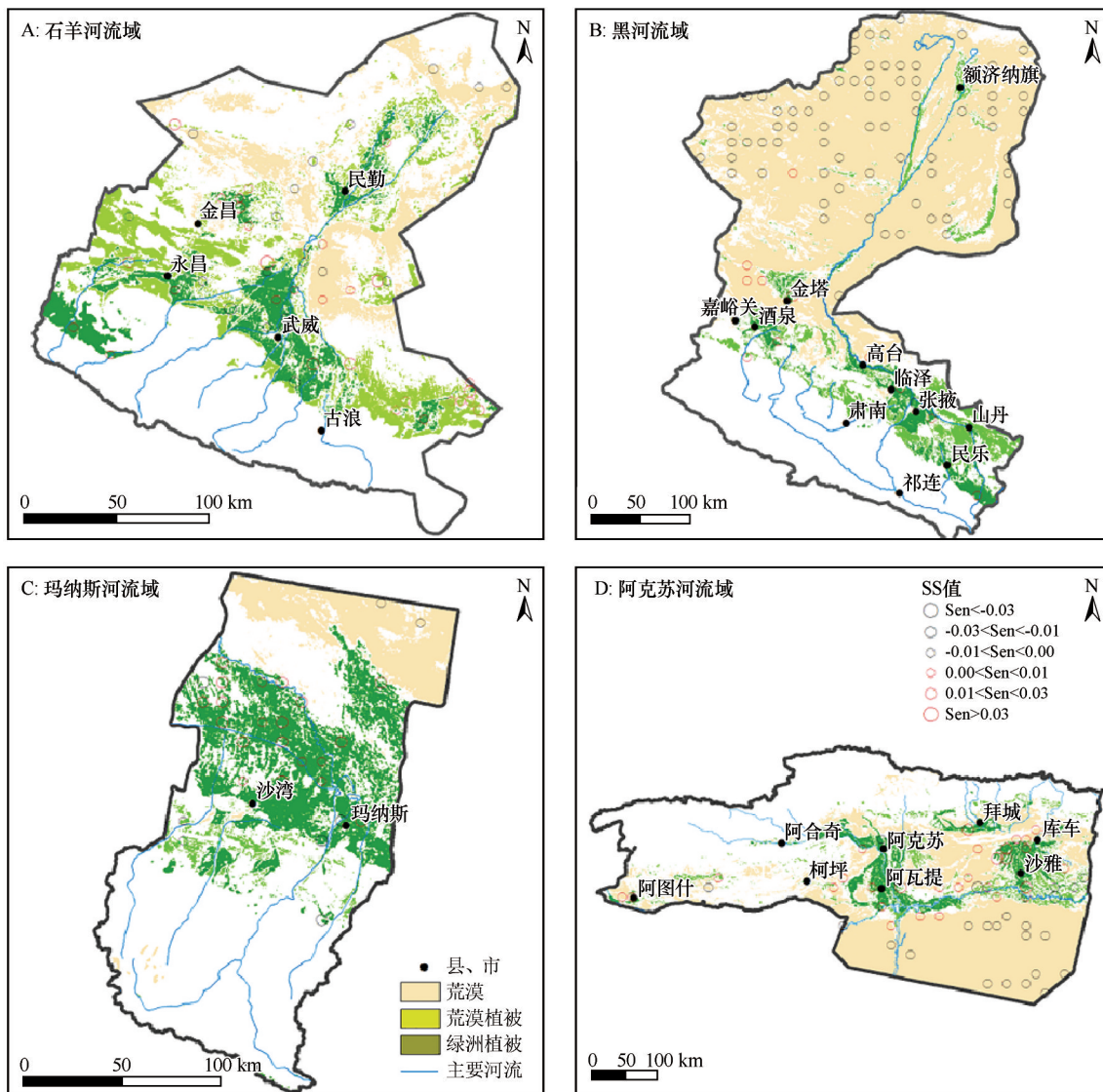


图5 稳定区覆被及绿色空间变化

Fig.5 Land cover distribution of the stable area along with the SS tested NDVI variation in space

东的绿洲、荒漠植被则呈上升趋势,金昌、永昌两地稳定绿洲、荒漠植被NDVI趋于增加,下游稳定区以荒漠为主,NDVI呈减小趋势;黑河片区稳定区中荒漠面积占比最大,NDVI呈减小趋势,中游稳定的绿洲、荒漠植被绿度有所增加,植被活动增强;玛纳斯片区以中游绿洲区最为稳定,且绿度显著增加,以玛纳斯、沙湾两县周边增加最为明显;阿克苏片区与黑河片区NDVI增减态势与黑河类似,中游阿克苏、库车地区的绿洲稳定区植被绿度上升,下游荒漠区则呈减小趋势。总体来看,4个代表性流域荒漠-绿洲体系的稳定区均呈现绿洲更绿、荒漠更荒的情形。

### 3.3.4 变化区特征

对4个代表性流域荒漠-绿洲体系的变化区进

行统计分析,SS值的空间分布如图6所示。石羊河流域以武威绿洲北部及东侧潮水盆地、金昌绿洲西南部以及古浪西部NDVI增加明显;但武威绿洲中部NDVI发生降低,内部绿洲存在退化现象。黑河流域绿度增区主要发生在高台和酒泉之间的倾斜平原区,北部荒漠腹地绿度降低。玛纳斯河流域也以中部绿洲附近增加、南部和北部荒漠区减少为主要特征,NDVI动态高值较多,表明该区绿洲扩张的程度高。阿克苏河流域绝大部分变化区发生NDVI增加,表征着植被状况的总体改良。

## 4 讨论

方法和数据在时空分辨率上的契合是生态水

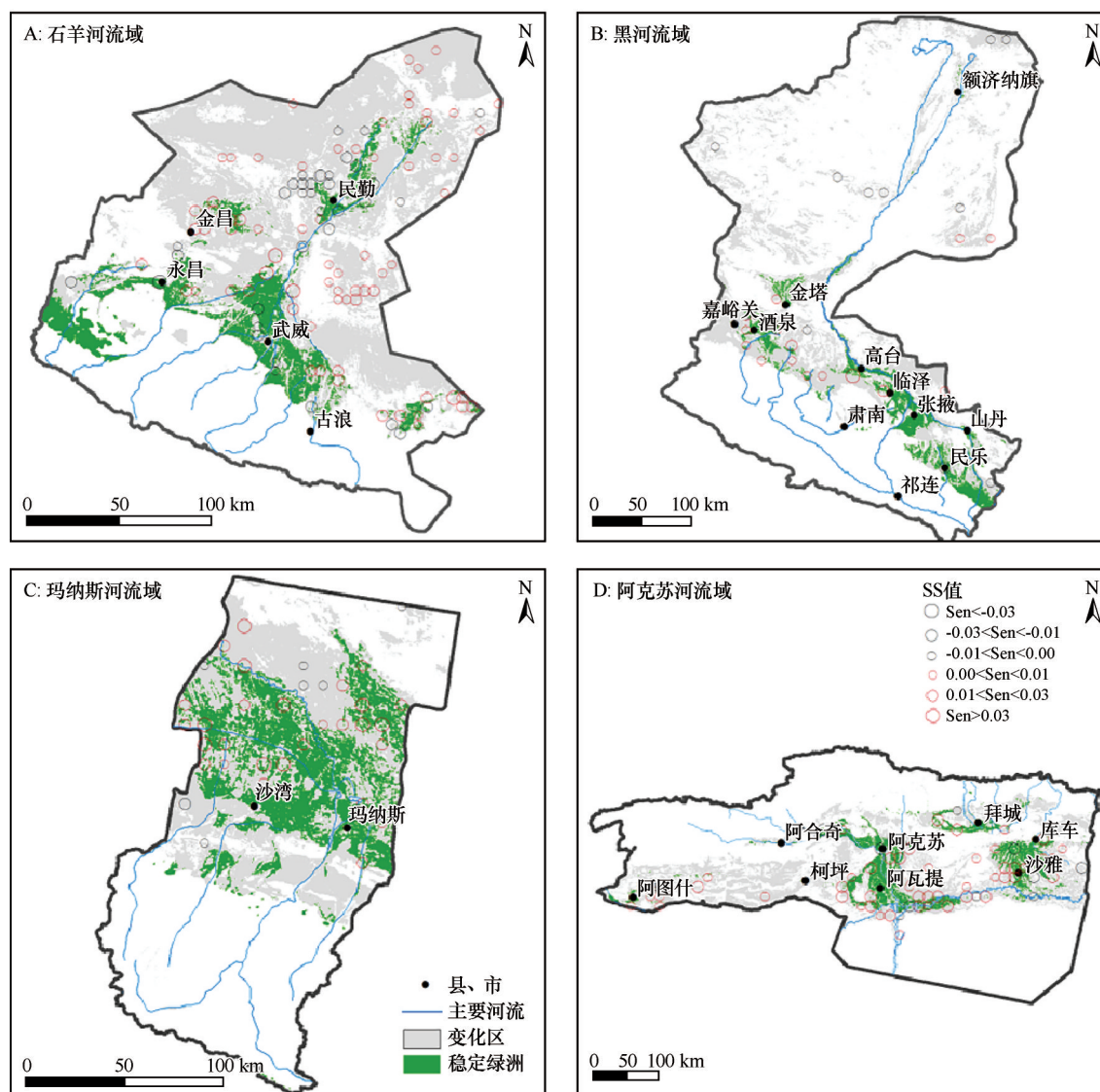


图6 变化区覆被及绿度空间变化

Fig.6 Land cover distribution of the unstable area along with the SS tested NDVI variation in space

文过程及其变化研究的基础。ESA-LUC数据存在地类上“型-值”不对应问题,某些高(低)植被生产力类型存在低(高)NDVI现象,这是我们基于两套数据进行阈值划分的初衷。本文通过逐像元对比及数理统计进行绿洲-荒漠划分,精度约90%,与目视解译、决策树分类等方法精度相近<sup>[28-30]</sup>。特别是基于“型-值”对应的异源数据融合方法,有利于西北干旱区流域尺度基础覆被数据集的快速构建和流域资源综合管理的开展。

各代表性区域阈值率定结果相异,与参照覆被本底(ESA-LUC)、基质类型占比以及域内降水等因素有关。石羊河流域位于干旱区最东端,受东亚季风影响较多,水汽输送和降水也相对较丰,荒漠植被与绿洲植被的绿度更为相近,两者的分类阈值较高;越往西部,因水汽输送机制发生变异,平原区降水减少,所支撑天然植被的NDVI发生降低,绿洲和荒漠植被的分类阈值也较低。西北干旱平原区面积广阔,荒漠基质占比大,本地降水支撑的荒漠植被型和荒漠之间的NDVI分类阈值较小;石羊河流域和黑河流域外围分别为腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠,很具代表性。玛纳斯河流域位于准噶尔盆地南侧,属天山北坡倾斜平原,年降水量175 mm,低于东部石羊河流域,高于其他代表区(表1),平原区总面积较小,按ESA-LUC体系聚类,绿洲占比达50%以上,荒漠植被类占比较小,导致该区高生产力覆被分类阈值较低,而低生产力覆被类型分类阈值较高。

近年来,石羊河流域平原区降水呈上升趋势<sup>[31]</sup>,出山径流呈减小趋势<sup>[32]</sup>,两者分别主要支撑荒漠植被和绿洲植被的生长,与本文“荒漠植被增强和武威绿洲内部绿洲退化”的结论相适应;但石羊河流域绿洲植被活动总体呈现增强态势,与引疏济金、景电二期等工程的水资源输送有关;黑河流域山区降水以及出山径流量增加明显<sup>[33]</sup>,绿洲NDVI与降水、径流的趋同关系良好<sup>[34]</sup>,植被活动在山前倾斜平原地带(以绿洲和荒漠植被为主)增强,在下游荒漠区发生减弱,可能与中游用水增加有关<sup>[35]</sup>,如张掖地区的湿地公园建设等,使中游耗水增加,同时促发该区NDVI的增加;玛纳斯河和阿克苏河流域也有类似情况<sup>[36-39]</sup>,阿克苏河流域在统计期间出山径流增加,水资源供给较充足,中游绿洲植被NDVI呈现显著增长趋势,绿洲扩张导致的用水增加,下游荒漠区NDVI发生降低。总体来看,水

资源在绿洲区的集中消耗,是西北干旱区荒漠更荒,绿洲更绿的主要原因<sup>[37]</sup>。

## 5 结论

基于ESA-LUC和MODIS-NDVI两套数据融合,量化分析了2001—2015年中国西北4个代表性流域中下游平原区干旱荒漠-绿洲体系绿洲植被、荒漠植被以及荒漠等覆被类型动态及其指征的植被演替时空特征。

以单一植被指标(如NDVI)为控制变量进行陆表覆被格局分析,所厘定阈值框架与所采用参照覆被本底(如ESA-LUC)关系密切;4个代表区的范例研究表明,因水文气象、基质类型和绿洲开发程度等因素的区间差异,所得NDVI阈值不尽相同。

干旱平原区植被动态的活跃程度与3个方面的因素有关。一是绿洲开发程度,二是区域降水变化,三是荒漠本底的面积占比。绿洲开发推动荒漠植被向绿洲植被的转换,降水对荒漠基质的改造作用明显;统计上,荒漠本底占比大小对LUC动态具有抑制性调节作用。

统计期间,4个代表性流域荒漠-绿洲体系的稳定区均呈现绿洲更绿、荒漠更荒的情形,与中游绿洲水资源截取耗用有关。变化区情形相对复杂,接近绿洲区域变幅较大,受垦殖和供水影响明显;远离绿洲区如荒漠腹地变幅较小,地表覆被主要受区域降水变化的调节。

基于“型-值”对应的异源数据融合,有利于区域LUC数据体系完善和质量提升,是旱区水资源科学规划和流域综合管理的基础性工作。

## 参考文献:

- [1] 李秀彬.全球环境变化研究的核心领域:土地利用/土地覆被变化的国际研究动向[J].地理学报,1996,63(6):553-558.
- [2] 华文剑,陈海山,李兴.中国土地利用/覆盖变化及其气候效应的研究综述[J].地球科学进展,2014,29(9):1025-1036.
- [3] 热伊莱·卡得尔,玉苏甫·买买提,玉素甫江·如素力.伊犁河谷2001—2014年地表温度时空分异特征[J].中国沙漠,2018,38(3):637-644.
- [4] 刘纪远,刘明亮,庄大方,等.中国近期土地利用变化的空间格局分析[J].中国科学:地球科学,2002,32(12):1031-1040.
- [5] 李常斌,杨林山,杨文瑾,等.洮河流域土地利用/土地覆被变化及其驱动机制研究[J].地理科学,2014,34(7):849-855.
- [6] 陈曦,罗格平.干旱区绿洲生态研究及其进展[J].干旱区地理,2008,31(4):487-495.
- [7] 穆桂金,贺俊霞,雷加强,等.再议绿洲-沙漠过渡带:以策勒

- 绿洲-沙漠过渡带为例[J]. 干旱区地理, 2013, 36(2): 195-202.
- [8] 徐学选, 张北赢, 白晓华. 黄土丘陵区土壤水资源与土地利用的耦合研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 166-169.
- [9] 王根绪, 杨玲媛, 陈玲, 等. 黑河流域土地利用变化对地下水资源的影响[J]. 地理学报, 2005, 60(3): 456-466.
- [10] 马心依, 栗晓玲, 张更喜. 基于归一化植被指数估算黑河中游地区植被生态耗水量[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(8): 55-62.
- [11] 张飞, 郭玉川, 姜红涛, 等. 气候和土地利用/覆盖变化对渭干河-库车河三角洲绿洲水资源的影响[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(23): 5716-5723.
- [12] 汪松, 王斌, 刘长征, 等. 利用Landsat时序NDVI数据进行新疆石河子垦区灌溉作物分类[J]. 测绘通报, 2016(9): 56-59.
- [13] 齐善忠, 罗芳, 肖洪浪. 干旱内陆河流域土地利用变化及其对环境的影响: 以西北地区黑河流域为例[J]. 生态环境, 2006, 15(4): 757-760.
- [14] 贾珍珍, 巩杰, 张影. 近35 a来疏勒河中下游绿洲化-荒漠化时空变化[J]. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1294-1302.
- [15] 谢家丽, 颜长珍, 李森, 等. 近35 a内蒙古阿拉善盟绿洲化过程遥感分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(4): 1142-1147.
- [16] 王长耀, 骆成凤, 齐述华, 等. NDVI-Ts空间全国土地覆盖分类方法研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(1): 93-99.
- [17] 马丽, 徐新刚, 刘良云, 等. 基于多时相NDVI及特征波段的作物分类研究[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(5): 520-524.
- [18] 焦伟, 陈亚宁, 李稚. 西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J]. 生态学杂志, 2017, 36(1): 181-189.
- [19] 王万瑞, 王刘明, 张雪蕾, 等. 1956—2015年洮河径流演变特征研究[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 92-99.
- [20] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 气候变化和人类活动对洮河流域植被动态的影响研究[J]. 资源科学, 2014, 36(9): 1941-1948.
- [21] 杨林山, 李常斌, 王帅兵, 等. 洮河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11): 102-109.
- [22] Li C, Wang L, Wang W, et al. An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability[J]. Journal of Hydrology, 2018, 559(12): 30-42.
- [23] Sen P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [24] 张立峰, 闫浩文, 杨树文, 等. 黑河流域植被覆盖变化及其对地形的响应[J]. 遥感信息, 2018, 33(2): 46-52.
- [25] 钱金波. 基于MODIS数据的石羊河流域植被动态变化分析[J]. 中国科技信息, 2013(12): 40-41.
- [26] Duan C, Wu L, He L, et al. Spatio-temporal distribution pattern of vegetation coverage in Junggar Basin, Xinjiang [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(2): 72-76.
- [27] 张辉, 刘江华, 张超. 阿克苏河流域不同植被类型NDVI时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(4): 88-92.
- [28] 何朝霞. 基于指数的决策树土地利用分类算法研究[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(21): 176-180.
- [29] 李庆, 史敏伟. 基于随机森林的多时相Landsat8土地利用分类研究[J]. 信息技术与信息化, 2019(7): 181-183.
- [30] 高鑫, 徐景东, 冯阳, 等. 基于遥感与GIS的土地利用分类方法研究: 以河北省安新县为例[J]. 科技创新与应用, 2019, 263(7): 116-118.
- [31] 李玲萍, 杨永龙, 钱莉. 石羊河流域近45年气温和降水特征分析[J]. 干旱区研究, 2008, 25(5): 705-710.
- [32] 李玲萍, 刘明春. 石羊河流域出山口河流流量的变化趋势及特性分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 58-63.
- [33] 高宇, 袁勇, 方宏阳, 等. 近50年黑河流域降水变化特征分析[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(5): 16-21.
- [34] 李振朝, 韦志刚, 吕世华, 等. 河西地区绿洲NDVI的演变特征及与气候因子的关系分析[J]. 干旱区地理, 2008, 31(1): 82-87.
- [35] Jin X, Guangcheng H U, Wenmei L I. Hysteresis effect of runoff of the Heihe River on vegetation cover in the Ejina Oasis in Northwestern China [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 198-203.
- [36] 魏波. 玛纳斯河流域径流及气候变化趋势分析[J]. 北京农业, 2014(15): 184-189.
- [37] 高惠芸, 杨青, 梁岩鸿. 新疆阿克苏河流域降水的时空分布[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 70-74.
- [38] 刘新春, 杨青, 梁云. 近40年阿克苏河流域径流变化特征及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(3): 82-87.
- [39] 段峥嵘, 祖拜代·木依布拉, 夏建新. 基于NDVI的干旱区绿洲植被覆盖度动态变化分析: 以新疆阿克苏地区为例[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2018, 27(2): 1-5.

## Division and application of desert-oasis system in arid Northwest China based on ESA-LUC and MODIS-NDVI

Wu Lei, Li Changbin, Wang Liuming, Xie Xuhong, Zhang Yuan, Wei Jianmei

(College of Earth and Environment Sciences / MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In this study, the ESA-LUC and MODIS-NDVI data were adopted for pixel comparisons to calibrate matching values (thresholds) between the two datasets. Based on which, ESA-LUC types were clustered into three types including oasis vegetation (OV), desert vegetation (DV) and bareland (BL) by application of the calibrated NDVI thresholds. Correspondingly, it is the water outside the arid desert-oasis system that supports the OV growth, while local precipitation provides water for physiological consumption of the DV. The third type of the BL includes desert, hamada, gravel desert, and so on, featuring very low greenness or non-vegetative land surface. It is concluded that the referenced LUC is essential for NDVI thresholds determination for Clustering. NDVI thresholds were remarkably different due to hydrometeorology, matrix characteristics and oasis development in the middle and lower reaches where dominate the desert-oasis system, in the selected four representative basins. Classification by clustering results into strong effectiveness of oasis extension, local precipitation and desert matrix on vegetation dynamics. It is found that the stable OA become greener while the stable BL, barer during the time period from 2001 to 2015. In the unstable area, more increase is found near the stable OA, while less of that is located mainly in the interior desert where local precipitation feeds vegetative prosperity. Overall, a simple filtering technique provides opportunities for people to classify the arid desert-oasis system for better understanding of relationship between ecological water consumption and vegetation growth, then benefits soil-water planning and desert ecology protection in the resource-scarce and water-shortage area in Northwestern China

**Key words:** oasis vegetation; desert vegetation; bareland; ESA-LUC; MODIS-NDVI