

文章编号: 1008-2786-(2020)6-904-12

DOI:10.16089/j.cnki.1008-2786.000566

柯西河流域植被覆被变化特征及其土地利用背景分析

艾嘉会¹, 丁明军^{1,2*}, 张 华^{1,2}, 张华敏¹, 王贝贝¹

(1. 江西师范大学 地理与环境学院, 南昌 330022; 2. 鄱阳湖湿地与流域教育部重点实验室, 南昌 330022)

摘 要: 植被作为陆地生态系统的重要组成部分,其动态变化对于定量评估区域生态环境质量具有重要意义。本文以典型跨境流域——柯西河流域为例,基于 2000—2017 年 MODIS-NDVI 时序数据及土地利用数据,运用 Mann-Kendall 统计检验和 Sen's 趋势等方法分析该区域植被覆被的时空演变特征,并探讨该变化的土地利用背景。结果表明:(1)柯西河流域植被覆被空间分布差异明显,且 NDVI 值呈现“双峰”结构;(2)2000—2017 年柯西河流域植被覆被整体呈现增加趋势,但存在着一定的空间分异。区域尺度上,中国境内、印度境内和尼泊尔境内植被均呈上升趋势,但变化幅度差异明显,表现为印度 > 尼泊尔 > 中国;像元尺度上,植被改善的地区占整个研究区的 87.74%,主要分布于中国境内中部地区和尼泊尔境内中、南部地区以及印度境内的部分区域;NDVI 趋于降低的区域占整个研究区的 12.26%,主要集中于尼泊尔境内的加德满都地区及主要公路沿线和河流沿岸地区;(3)植被变化趋势与地形因子(高程、坡度、坡向)显著相关,其空间分布表现出明显的地形指向性;(4)植被变化显著区域与土地利用变化典型地区高度一致。裸地和水体的转化导致局部植被覆被升高;耕地和林地的转化导致局部地区植被覆被降低。研究结果可为柯西河流域土地利用政策的制定、生态环境的保护与建设、植被恢复及可持续发展提供一定的参考。

关键词: 植被;NDVI;土地利用;柯西河流域

中图分类号: K903

文献标志码: A

植被作为陆地生态系统的主体,是连接土壤、大气与陆地水体的“纽带”^[1],同时也被认为是全球变化的“指示器”^[2]。它不仅在全球物质循环和能量交换的环节中发挥关键作用,而且在保持全球生态系统稳定过程中具有无可替代的地位^[3-4]。植被指数可直观描绘出地表植被状况等信息,其中归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)是当前表征植被状况的最优参数之一,被广泛应用于地表植被覆被的研究中^[5-7]。

作为地理环境的关键部分,地表植被不仅与气温、降水因子联系紧密^[1,8-11],同时还受政策^[12-13]、放牧^[14-15]、薪柴需求^[16]、城市化扩张^[17-18]、土地利用等人类活动的影响^[19-21]。其中,土地利用作为人类在地球表面活动的最直接方式之一,其利用形式及强度的改变都将直接导致植被覆被发生变化^[18,20],东南亚、拉丁美洲的毁林造地^[22-23],非洲稀树草原农场开发^[24],喜马拉雅山西部的森林砍伐等^[16]土地利用形式均会导致植被覆被的明显降低;

收稿日期(Received date):2020-04-26;改回日期(Accepted date):2020-12-11

基金项目(Foundation item):中国科学院战略性先导科技专项资助(XDA20040201);国家自然科学基金(41761144081);江西师范大学研究生创新基金(YJS2019116)。[Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences(XDA20040201);National Natural Science Foundation of China(41761144081);Postgraduate Innovation Fund Project of Jiangxi Normal University(YJS2019116)]

作者简介(Biography):艾嘉会(1995-),女,江西高安人,硕士研究生,主要研究方向:土地利用/覆被变化研究。[AI Jiahui(1995-), female, born in Gaoan, Jiangxi province, M. Sc., candidate, research on land use/cover change] E-mail: 1184159536@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author):丁明军(1979-),男,湖北谷城人,博士,教授,主要研究方向:土地利用/覆被变化研究。[DING Mingjun(1979-), male, born in Gucheng, Hubei province, Ph. D., professor, research on land use/cover change] E-mail: dingmingjun1128@163.com

而我国黄土高原、喀斯特地区^[25]的退耕还林生态工程以及西部的“绿色换粮”生态恢复计划等政策导向下的土地利用变化则是植被覆被增加的重要动力^[26]。虽然当前国内在基于 NDVI 数据的植被覆被变化方面已开展了大量研究^[27-29],但有关跨境流域的研究案例较为少见。

柯西河流域位于青藏高原南缘,纵跨中国、尼泊尔、印度三个国家。不同国家自然环境及管理制度的差异导致该流域土地利用与植被覆被地域分异明显^[7,15,30-32]。近年来,随着人口迅速增长、城市化快速推进、乱砍滥伐、不合理的放牧、水土流失和洪水泛滥,该地区土地利用和植被覆被变化显著,流域可持续发展面临较大威胁,备受世界关注^[30-31,33-34]。当前,柯西河流域植被覆被及土地利用变化研究多关注于典型区域或类型,流域尺度上的研究较为薄弱^[7,30-31]。

本研究以柯西河流域为例,基于 2000—2017 年的 NDVI 时序数据集,结合 2000 年和 2017 年土地利用数据,采用 Mann-Kendall 统计检验和 Sen's 趋势等研究方法,分析该地区植被覆被的时空变化特征,并探讨其与土地利用变化之间的关系,以期对柯

西河流域土地利用政策的制定、生态环境的改善提供参考。

1 研究区域概况

柯西河流域位于 85°02'~88°57'E、25°24'~29°08'N,总面积约 $8.85 \times 10^4 \text{ km}^2$,纵跨中国、尼泊尔与印度三国(图 1),是世界上知名的跨境流域^[7],也是陆地上海拔落差最大的流域^[35]。流域内植被类型多样,垂直地带性显著。流域北部位于中国境内,是典型高寒地区,以草地分布为主;流域中部位于尼泊尔境内,以林地、耕地分布为主;流域南部位于印度境内,地形平坦、海拔低,以耕地分布为主。在海拔和南亚季风等因素的影响下,流域内降水时空分配不均,多年平均降雨量为 200~3000 mm,且年降水量的 80% 主要集中于 6 月—9 月。流域内人口分布空间差异明显,南部平原地区人口密度可达 1000 人/ km^2 ,而在地广人稀的北部地区人口密度不足 4 人/ km^2 ^[35]。农业和牧业是流域内居民的主要生计来源。

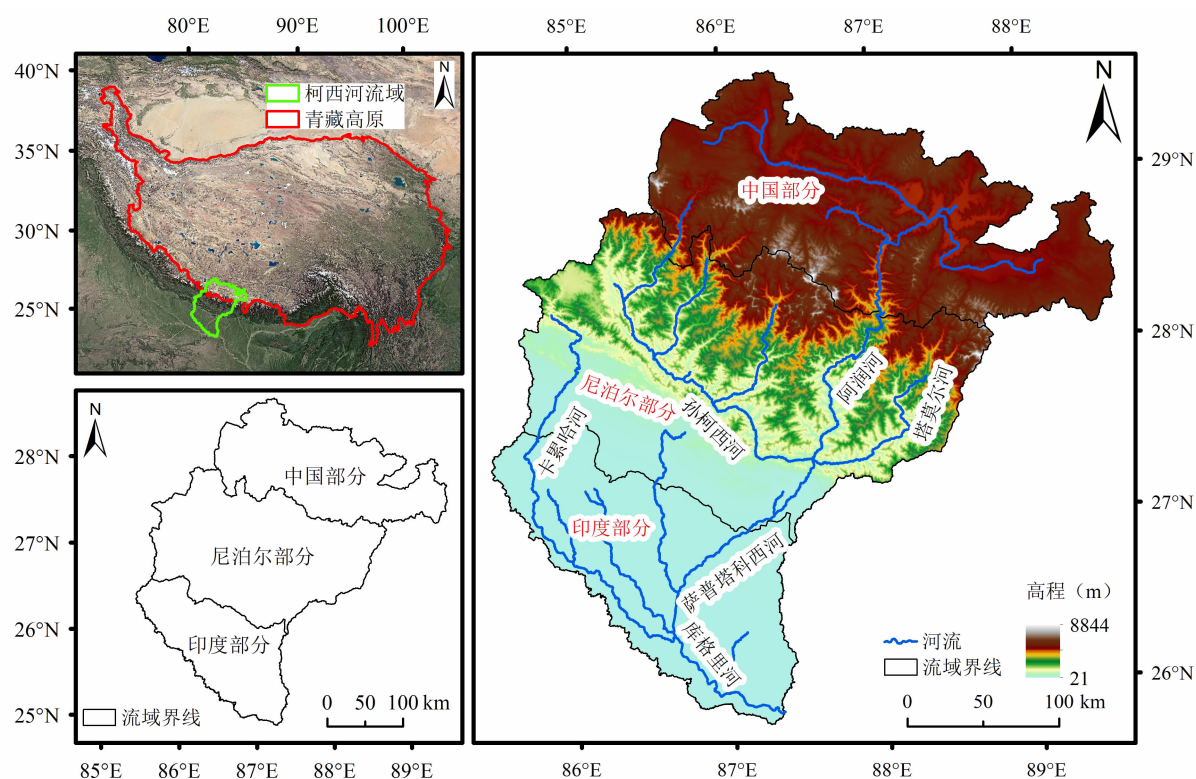


图 1 研究区域图

Fig. 1 Location of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源与预处理

NDVI 数据来源于美国国家航空航天局 (<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>), 空间分辨率为 500 m, 时间分辨率为 8 d^[36], 时段跨度为 2000—2017 年。为了消除云、大气状况等引起的植被指数异常值, 本文选取 Savitzky-Golay 滤波法对数据进行平滑处理^[8]。

2000 年土地利用数据来源于国际山地综合发展中心 (<https://www.icimod.org/>)^[37]。同时, 本研究选用 2017 年所有有效的 Landsat 8 OLI 卫星影像, 并结合高程、归一化差异植被指数、归一化差异雪被指数、归一化差异水指数数据, 基于 Google Earth Engine 平台, 采用随机森林分类方法解译得到 2017 年土地利用数据, 其总体分类精度超过 85%。

高程数据来源于地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>), 空间分辨率为 30 m。

2.2 高程、坡向与坡度带划分

研究将柯西河流域高程数据划分为 5 个等级^[38-39]: < 1000 m、1000 ~ 2000 m、2000 ~ 4000 m、4000 ~ 6000 m、> 6000 m。按照模式分级法中的等间距分级法对坡度进行分类^[40], 共划分为 12 级, 间距为 4°, 其中大于 44°的归为同一等级。以正北方向为始点, 将坡向划分为平地、东、西、南、北、东北、西北、东南、西南, 其中坡向为 -1 表示平地^[41]。

2.3 研究方法

2.3.1 趋势分析与检验

Sen's 趋势分析和 Mann-Kendall 检验是评估长时序数据变化趋势的常用方法, 已被广泛应用于气候、水文和植被等趋势分析中^[9, 42]。本文利用 Sen's 趋势分析法判断 2000—2017 年柯西河流域 NDVI 时序数据的变化趋势^[43]。该方法计算过程中数据样本不必遵循特定分布, 免受异常值的干预, 对误差具备较高的规避能力^[9], 表达式为:

$$k = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1 \leq i \leq j \leq m) \quad (1)$$

式中, k 为 Sen's 趋势; x_i 和 x_j 分别为 i 和 j 时刻的 NDVI 值; m 为数据的个数。当 $k > 0$ 时表示植被呈改善趋势, $k < 0$ 时表示植被呈下降趋势^[9]。

Mann-Kendall 检验作为一种非参数检验方

法^[44-45], 可用于评估 2000—2017 年植被 NDVI 变化趋势的显著性^[42], 公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{var}(S)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_k - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_i > 0) \\ 0 & (x_k - x_i = 0) \\ -1 & (x_k - x_i < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

式中, Z 为标准化后的检验统计量; S 为检验统计量; x_k 和 x_i 分别为第 k 和第 i 个数据; n 为长时序植被 NDVI 的个数; var 为计算的方差值。标准化后的 Z 符合标准正态分布, 假使 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则意指植被变化显著。

2.3.2 土地利用转移矩阵

土地利用转移矩阵可反映某个地区某个时期期初和期末各土地利用类型相互转化的结构特征, 同时还能精准地量化其转移变化情况, 可较好地描绘土地利用格局的时空演变过程^[46], 本文采用该方法分析柯西河流域 2000—2017 年土地利用转移情况, 其公式^[47]为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, S 为土地利用面积 (km^2); n 为土地利用类型数; i, j 分别为研究始期和末期的土地利用类型。

3 结果

3.1 柯西河流域植被覆盖空间分布特征

柯西河流域植被 NDVI 数值分布呈现出“双峰”结构 (图 2b), 年均值主要为 0.4 ~ 0.7, 且区域差异明显 (图 2a)。其中, 中部较高、南北较低, 高值大部分集中于研究区中部的尼泊尔境内, 低值区大部分位于流域北部的中国境内。其中, 植被覆盖较高的

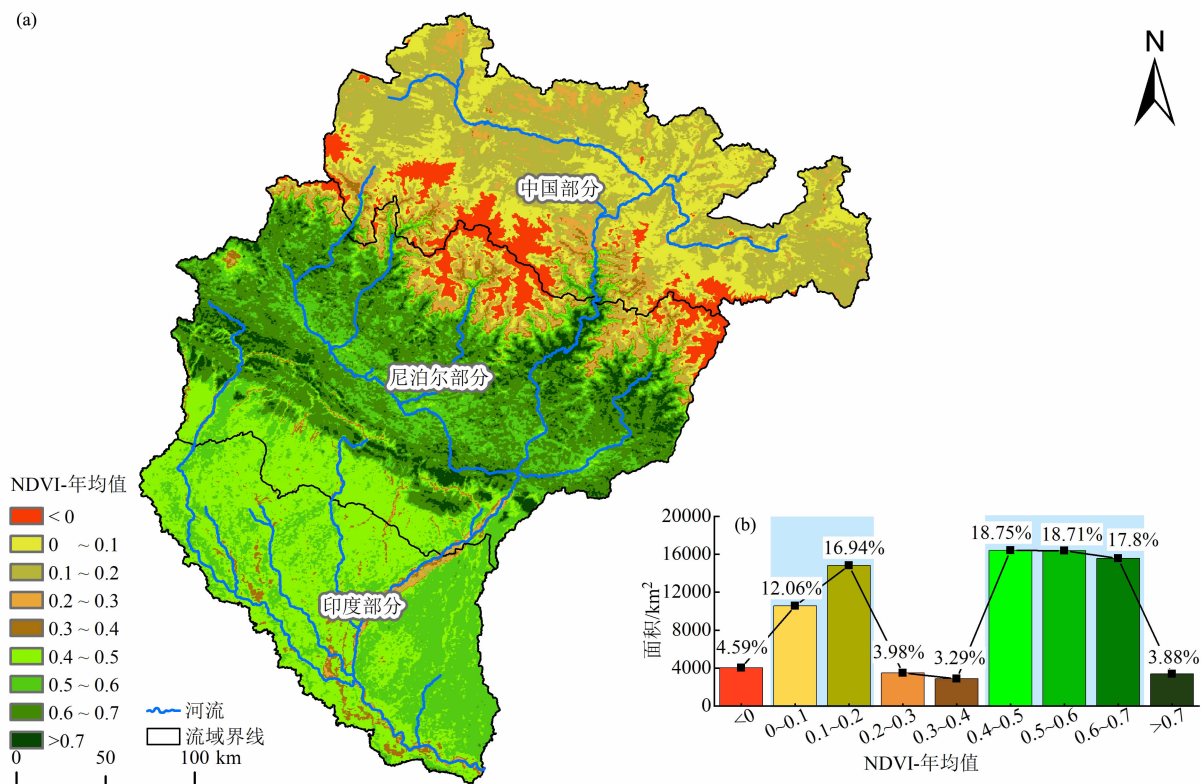


图2 柯西河流域2000—2017年植被NDVI空间分布(a)及频度分布(b)

Fig. 2 Spatial (a) and frequency (b) distribution of average annual NDVI in the Koshi River Basin from 2000 to 2017

区域相对集中,主要位于尼泊尔境内中南部地区、东北部的阿润河(Arun river)以及塔莫尔河(Tamor river)沿河地区,NDVI高达0.7,占整个区域的3.88%,植被类型以林地为主。尼泊尔境内的河谷以及南部地区、印度境内海拔较低区域,耕地广泛分布,与林地相比,NDVI值略低(0.4~0.7)。研究区北部的中国境内及其与尼泊尔境内相邻的区域NDVI值偏低,主要为0~0.4,土地利用类型以草地和裸地为主。年均NDVI值小于0的无植被覆盖区域主要位于中国与尼泊尔交界的地区,该区域土地利用类型多为冰川和永久性积雪。

3.2 柯西河流域植被覆被年际变化特征

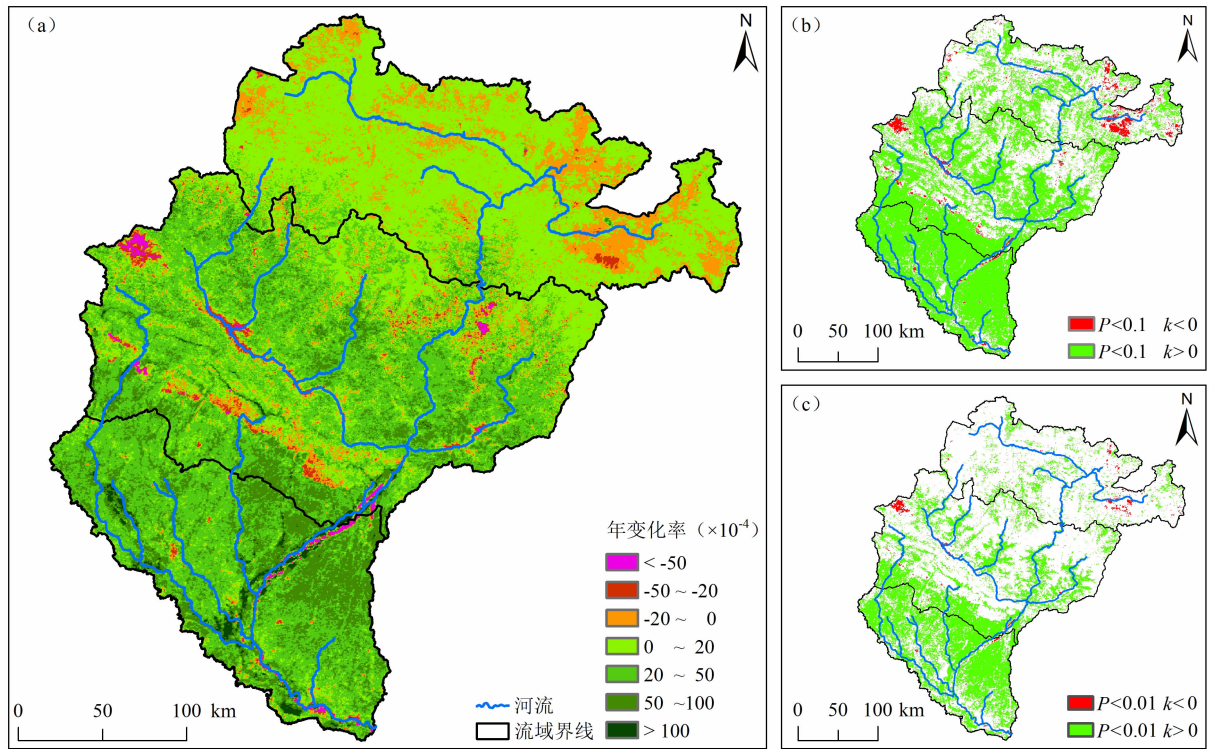
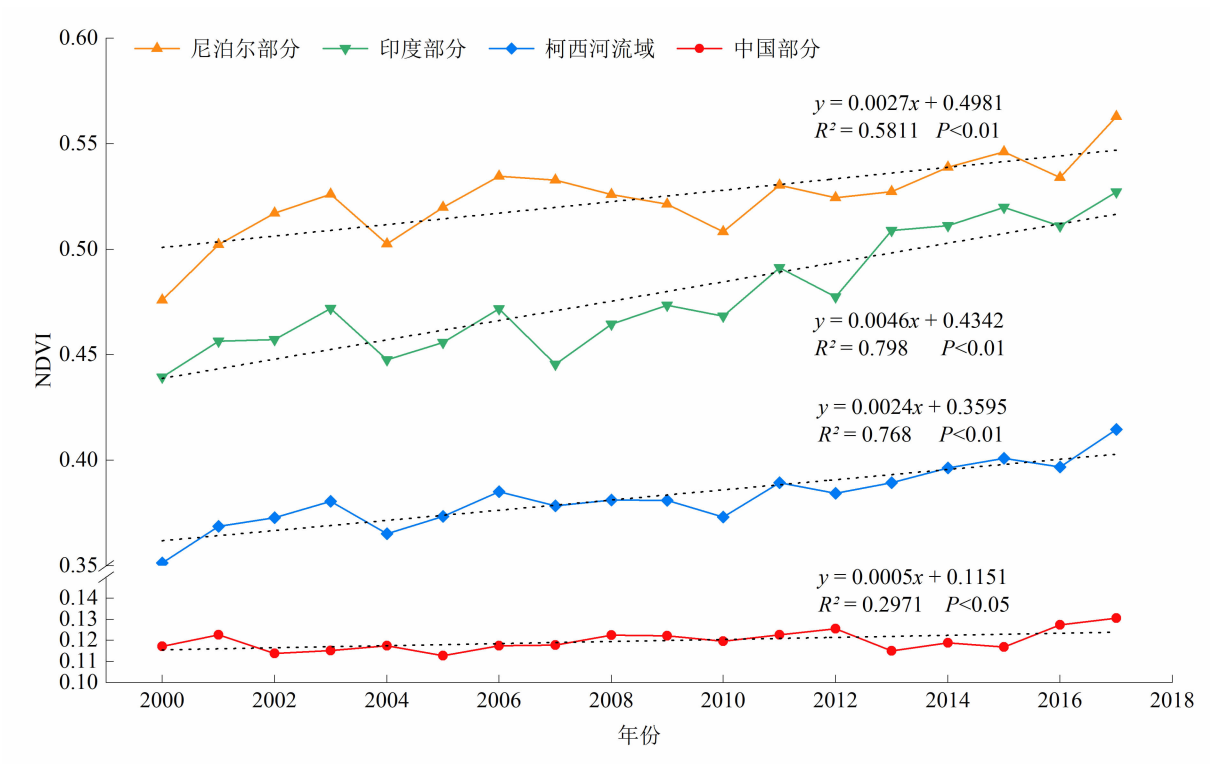
3.2.1 区域尺度的年际变化特征

2000—2017年柯西河流域植被NDVI整体呈现显著增加态势,但区域差异明显(图3)。研究时段内柯西河流域植被NDVI均值介于0.35~0.42之间,上升趋势较为明显,年增幅可达 24×10^{-4} ($P < 0.01$)。从不同的区域来看,中国境内、尼泊尔境内和印度境内植被NDVI与研究区整体变化趋势一致,均呈增加趋势,但增加幅度不同。尼泊尔境内增速略高于全

区,年增幅为 27×10^{-4} ($P < 0.01$),植被NDVI年均值介于0.48~0.56之间。中国境内植被NDVI年均值最低,仅介于0.11~0.13之间,增加幅度最小,年增幅为 5×10^{-4} ($P < 0.05$)。印度境内植被NDVI年均值为0.43~0.53,略低于尼泊尔境内,但其变化幅度最大,增速最高,年增幅为 46×10^{-4} ($P < 0.01$)。

3.2.2 像元尺度的植被覆被年际变化趋势分析

2000—2017年间,柯西河流域植被覆被年际变化趋势在像元水平上区域差异明显(图4a)。在空间布局上,植被覆被呈上升趋势的区域占柯西河流域的87.74%,主要分布于中国境内中部地区,尼泊尔境内中、南部区域以及印度境内部分区域。呈下降趋势的区域占研究区的12.26%,集中分布于印度境内的萨普塔科西河(Saptakoshi river)上游沿岸地区、尼泊尔境内的加德满都及其周边河谷地区、南部的公路干线沿线、阿润河中游东侧地区和塔莫尔河下游沿岸地区。不同显著水平也存在明显的空间分布差异,在 $P < 0.1$ 显著水平上,呈显著上升趋势的区域占柯西河流域的54.82%,主要分布于尼泊尔境内南部、中部的五条主要河流沿岸地区以及印度境内部分地区,呈显著下降趋势的区域占研究区



的 2.43%, 其空间分布与整个区域的下降趋势空间分布较一致(图 4b); 在 $P < 0.01$ 显著水平上, 呈显著上升趋势的区域占比为 31.73%, 主要位于印度境内东部、北部和尼泊尔境内南部, 而呈显著下降趋势的区域占比为 0.80%, 大多分布于加德满都及周边地区(图 4c)。

柯西河流域 NDVI 整体以上升趋势为主(图 5), 其中, 年增幅度在 $0 \sim 20 \times 10^{-4}$ 的区域分布较多, 占研究区的 38.29%, $20 \times 10^{-4} \sim 50 \times 10^{-4}$ 的区域占比居中, $50 \times 10^{-4} \sim 0.01$ 的区域次之, 占研究区的 14.02%, 而大于 0.01 的区域最少, 仅占研究区的 1.14%。年降幅度在 $-20 \times 10^{-4} \sim 0$ 的区域分布较多, 占该流域总面积的 10.42%, $-50 \times 10^{-4} \sim -20 \times 10^{-4}$ 的区域次之, 而小于 -50×10^{-4} 的区域最少, 仅占研究区的 0.50%。

3.3 植被变化趋势与地形因子的关系

2000—2017 年柯西河流域植被变化趋势与地

形因子显著相关。在海拔低于 1000 m 的地区, 植被上升趋势最为明显, 4000 ~ 6000 m 区域次之; 占比超过 50% 的下降趋势发生在 4000 ~ 6000 m 区域, 0 ~ 1000 m 低海拔区植被下降趋势次之; 其余各海拔区间内上升与下降趋势占比均较低且基本一致(图 6a)。由图 6b 可知, 各个坡向的植被上升、下降趋势基本相同。相较而言, 东、西、南、北坡向的植被变化趋势占比较大, 均超过了 13%, 而西北、西南、东南、东北坡向的植被变化趋势所占比例均约占 5%。图 6c 中植被上升、下降趋势均呈现随坡度的升高而减少的趋势, $0 \sim 4^\circ$ 区间内植被变化比例最大, $4 \sim 8^\circ$ 区间变化比例次之, 其余变化比例均小于 10%。

3.4 植被覆被变化与土地利用变化的关系

植被覆被动态变化与气候变化和人类活动关系密切^[19]。近年来, 许多研究表明植被覆被变化的主要驱动力已由气候因素转变为人为因素^[48], 其中, 土地利用变化的影响尤为明显^[20,23]。因此, 本文基

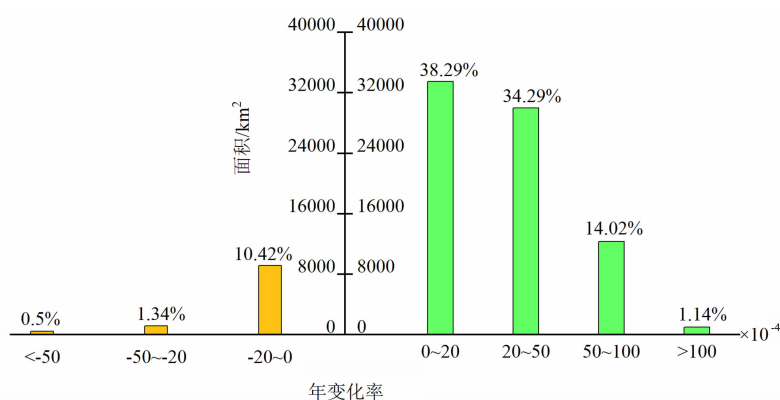


图 5 2000—2017 年柯西河流域植被 NDVI 变化率各区间所占比例

Fig. 5 Percentage of change rates of NDVI in proportion in the Koshi River Basin from 2000 to 2017

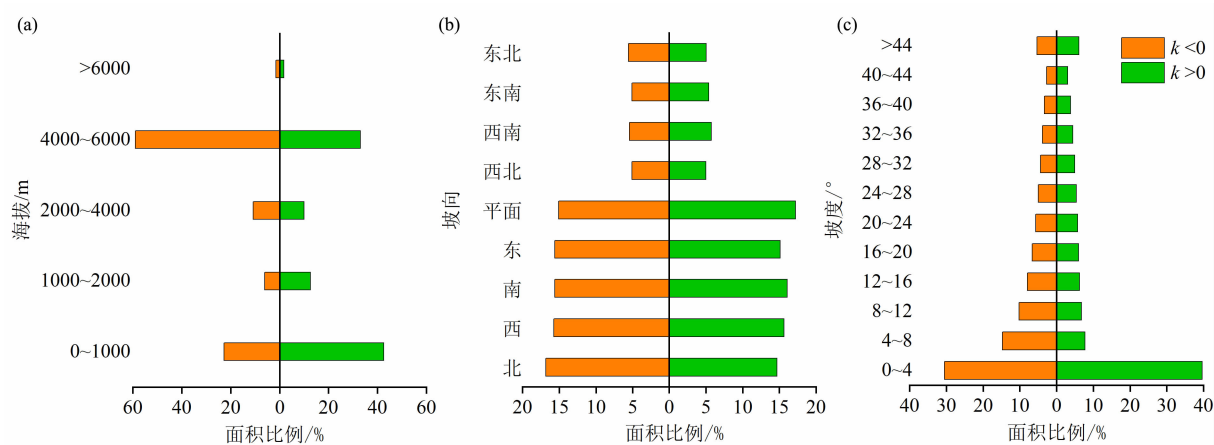


图 6 不同海拔 (a)、坡向 (b)、坡度 (c) 上的植被变化率的比例分布

Fig. 6 Proportional distribution of vegetation change rates at different altitudes (a), slope aspects (b) and gradients (c)

于柯西河流域 2000 年和 2017 年土地利用数据,选定研究区内植被覆被变化显著($P < 0.1$)的典型区域,探究土地利用变化背景下的植被覆被变化状况。

由图 7(a)可知,阿润河中上游东侧区域植被下降趋势明显,主要是由于该典型区域海拔落差较大、属于滑坡易发区和土壤侵蚀严重分布区^[49],滑坡和土壤侵蚀事件发生的概率较高,使得该区域土地利用类型转换以林地向水体、裸地和草地的转化,以及草地向裸地、水体的转化为主,从而导致植被覆被呈现下降趋势。典型区 b 主要包括加德满都及其周边地区、孙科西河(Sunkoshi river)河谷等地区,该区主要以耕地向建设用地转移为主,城市扩张现象明显,从而导致植被覆被呈现下降趋势,这与前人研究结果较为一致^[30-31]。一方面,山区土壤养分贫瘠,加之气候变化导致的旱涝灾害发生频率增加,从而限制了该区域农业的发展,促使部分山区居民不断向平原地区迁移^[50],造成平原地区城镇建设用地扩张严重。另一方面,商业的发展促使人口迅速向城市涌入,加速了城市建设用地的扩张,而地方政府缺乏城市用地规划,大量耕地被建设用地占用^[30-31]。此外,该区南部属于景观交错带,人类活动频繁、人为干扰严重^[51-52],林地转为耕地现象较为普遍,在一定程度上促使植被覆被呈现下降趋势。典型区 c 位于恒河平原冲积扇左侧的河道区域,该区域植被变

化趋势存在上升与下降趋势并存的现象,一方面该地区洪水发生频率较高,洪水泛滥以及泥沙淤积^[33],导致位于河道两侧区域的耕地、林地、草地向水体转化,使得植被覆被呈现下降趋势;另一方面,该区域大多数防洪工作以河流控制为主,缺乏洪水管理的观念,从而导致河道迁移^[33],但在印度“绿色革命”和集约化农业背景下^[53],完全废弃的河道大部分转为农田^[33],水体、裸地分别流转为耕地、草地,促使植被覆被呈现上升趋势。此外,库格里河(Chugri river)和卡累哈河(Kareha river)沿岸地区(典型区 d)在印度“绿色革命”和集约化农业背景下^[53],植被覆被也呈明显上升趋势。

4 讨论

柯西河流域植被 NDVI 的时空变化结果显示,研究期内整个流域 87.74% 的区域植被覆被呈现改善趋势,仅 12.26% 的区域呈现退化趋势,该结果与大部分已有研究结论保持较好的一致性。已有研究基于 GIMMS NDVI3g 和 MODIS NDVI(MOD13Q1)数据分别分析了 1982—2015 年和 2000—2017 年尼泊尔植被覆被变化特征,两个时间段的结果均显示该地区植被覆被整体上呈现增加趋势^[54-55];同样,基于 SPOT-VGT NDVI 数据对 2000—2011 年间柯

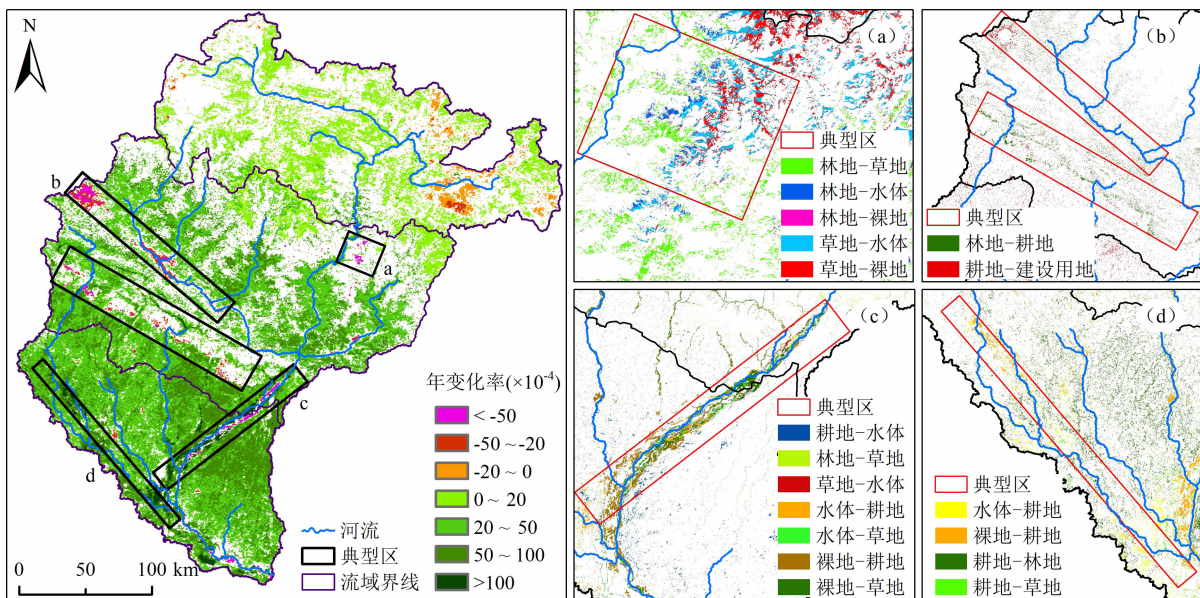


图 7 柯西河流域 2000—2017 年典型区域植被变化趋势与土地利用类型变化示意图

Fig. 7 Schematic diagram of vegetation change trends and changes in land use types in typical regions of the Koshi River Basin from 2000 to 2017

西河流域生长季植被 NDVI 变化趋势进行的研究结果表明,生长季植被 NDVI 显著增加,年增幅为 34×10^{-4} ($P < 0.01$)^[7];不同的研究结果均得出该区域植被覆被整体呈增加趋势,只是在变化幅度方面存在一定的差异,这可能与研究中使用的数据源、时间段不同有关。

柯西河流域内不同国家所在地区植被覆被变化存在着一定差异,这可能与不同的土地利用管理政策以及气候变化差异有关。柯西河流域内的中国区域地处青藏高原南部,大部分地区植被覆被呈现小幅度的上升趋势,这在一定程度上得益于一系列生态工程建设;萨迦县和定结县的下降趋势(图7东北部所示)可能与该区域近年来气候暖干化导致的植被返青期推迟、生长季缩短相关^[56-57]。尼泊尔境内植被覆被上升趋势显著,林地和耕地转化较明显。Mishra 等研究表明在人类活动较少的地区,气温上升、氮沉积和 CO₂ 施肥率的增加,促进该地区植被的生长^[58];此外, Hussain 等发现洪水和干旱频发^[59]导致该区域部分农业地区收入不稳定,农业人口流出,弃耕现象严重,频繁出现耕地转化为林地和草地的现象^[34,59],使得植被覆被增加,这与本研究结论较为一致;尼泊尔 2000 年宣布以社区为基础的森林管理政策,也极大地驱动了当地居民有效保护林地^[12,32],再加上尼泊尔 2001 年制定的以可持续发展为目标的土地利用政策^[13],均使得尼泊尔部分地区植被覆被呈现上升趋势。印度境内植被覆被上升趋势明显可能是因为“绿色革命”之后,印度政府开始加强水资源合理利用,灌溉面积大幅增加,再加上化肥的使用,以及农业集约化模式的发展^[53],显著促进了植被覆被的提升。

植被覆被变化是自然因素和人为因素综合作用的结果,本研究中主要分析了植被覆被变化的土地利用背景因素,并辅以已有的研究成果进行相应的解释,今后研究中还应结合气候等自然因素进行分析,以期获得更为全面的研究结论。

5 结论

本文基于 MODIS-NDVI 时序数据,系统分析了柯西河流域植被覆被变化的时空格局特征,并结合 2000 年和 2017 年柯西河流域土地利用数据,探讨

了柯西河流域典型地区植被覆被变化的土地利用背景特征,旨在为跨境流域植被恢复及可持续发展提供参考。结果表明:

(1)柯西河流域植被覆被空间分布差异明显,呈现自中部向南部、北部递减的态势;NDVI 年均值主要集中于 0.4~0.7,且呈现“双峰”结构。

(2)柯西河流域植被覆被总体呈现增加态势,但空间分异明显。区域尺度上,印度境内增幅最大,中国境内最小。像元尺度上,植被覆被呈上升趋势的区域占整个流域的 87.74%,大多分布于尼泊尔境内中、南部区域和印度境内部分区域。NDVI 呈下降趋势的地区仅占整个流域的 12.26%,主要集中于印度境内的萨普塔科西河上游沿岸地区、尼泊尔境内的加德满都及其周边河谷地区、阿润河中游东侧地区和塔莫尔河下游沿岸等地区。植被覆被变化趋势与高程、坡度、坡向密切相关,具有较强的地形指向性,其中,低海拔区、坡度较缓地区增加趋势最明显。

(3)柯西河流域植被覆被变化显著区域与土地利用变化剧烈区高度一致,且土地利用变化对植被覆被的影响具有双向性。一方面,裸地、水体转为耕地、草地,耕地转为林地、草地等土地利用变化有效改善了区域生态环境,植被覆被呈现上升趋势;另一方面,林地变更为草地、水体、裸地和耕地,草地变更为水体和裸地,耕地变更为建设用地等土地类型变动,导致了部分区域植被覆被呈现下降趋势。

参考文献 (References)

- [1] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析[J]. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210. [SUN Hongyu, WANG Changyao, NIU Zheng, et al. Analysis of the vegetation cover change and the relationship between NDVI and environmental factors by using NOAA time series data[J]. Journal of Remote Sensing, 1998, 2(3): 204-210]
- [2] PARMESAN C, YOHE G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 2003, 421(6918): 37-42.
- [3] PIAO Shilong, WANG Xuhui, CIAIS P, et al. Changes in satellite-derived vegetation growth trend in temperate and boreal Eurasia from 1982 to 2006[J]. Global Change Biology, 2011, 17(10): 3228-3239.
- [4] 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.
- [5] HUANG Xianglin, ZHANG Tingbin, YI Guihua, et al. Dynamic changes of NDVI in the growing season of the Tibetan Plateau during the past 17 years and its response to climate change [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, **16**(18): 1–21.
- [6] 张戈丽, 徐兴良, 周才平, 等. 近 30 年来呼伦贝尔地区草地植被变化对气候变化的响应[J]. *地理学报*, 2011, **66**(1): 47–58. [ZHANG Geli, XU Xingliang, ZHOU Caiping, et al. Responses of vegetation changes to climatic variations in Hulun Buir grassland in past 30 years[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(1): 47–58]
- [7] ZHANG Yili, GAO Jungang, LIU Linshan, et al. NDVI-based vegetation changes and their responses to climate change from 1982 to 2011: a case study in the Koshi River Basin in the middle Himalayas[J]. *Global and Planetary Change*, 2013, **108**: 139–148.
- [8] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001–2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J]. *地理学报*, 2012, **67**(9): 1255–1268. [MU Shaojie, LI Jianlong, CHEN Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001–2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, **67**(9): 1255–1268]
- [9] 刘宪锋, 潘耀忠, 朱秀芳, 等. 2000–2014 年秦巴山区植被覆盖度时空变化特征及其归因[J]. *地理学报*, 2015, **70**(5): 705–716. [LIU Xianfeng, PAN Yaozhong, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal variation of vegetation coverage in Qinling-Daba Mountains in relation to environmental factors[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(5): 705–716]
- [10] 拉巴, 拉珍, 拉巴卓玛, 等. 2000–2018 年那曲市植被 NDVI 变化及气候变化响应[J]. *山地学报*, 2019, **37**(4): 499–507. [LA Ba, LA Zhen, LA Ba Droma, et al. NDVI change and its response to climate change in Nag Qu City during 2000–2018 [J]. *Mountain Research*, 2019, **37**(4): 499–507]
- [11] 韦小茶, 周秋文, 张继, 等. 1982–2016 年广西 NDVI 时空变化及其影响因素[J]. *山地学报*, 2020, **38**(4): 520–531. [WEI Xiaocha, ZHOU Qiuwen, ZHANG Ji, et al. Spatial-temporal changes of NDVI and its influence factors in Guangxi, China during 1982–2016 [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(4): 520–531]
- [12] TIMILSINA N, ROSS M S, HEINEN J T. A community analysis of sal (*Shorea robusta*) forests in the western Terai of Nepal[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, **241**(1–3): 223–234.
- [13] NEPAL P, KHANAL N R, ZHANG Yili, et al. Land use policies in Nepal: an overview[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **31**(16): 2203–2212.
- [14] JUTILA H. Effect of grazing on the vegetation of shore meadows along the Bothnian Sea, Finland[J]. *Plant Ecology*, 1999, **140**(1): 77–88.
- [15] 赵旺林, 罗天祥, 张林. 气候变化与放牧对西藏典型高寒荒漠草地植被指数变化的相对影响[J]. *生态学报*, 2019, **39**(22): 8494–8503. [ZHAO Wanglin, LUO Tianxiang, ZHANG Lin. Relative impact of climate change and grazing on NDVI variations in typical alpine desert grasslands in Tibet [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(22): 8494–8503]
- [16] QAMER F, SHEHZAD K, ABBAS S, et al. Mapping deforestation and forest degradation patterns in Western Himalaya, Pakistan[J]. *Remote Sensing*, 2016, **8**(5): 1–17.
- [17] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力分析[J]. *生态学报*, 2019, **39**(20): 7722–7736. [ZHAO Weiqing, LI Jingwei, CHU Lin, et al. Analysis of spatial and temporal variation in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(20): 7722–7736]
- [18] 史培军, 陈晋, 潘耀忠. 深圳市土地利用变化机制分析[J]. *地理学报*, 2000, **55**(2): 151–160. [SHI Peijun, CHEN Jin, PAN Yaozhong. Landuse change mechanism in Shenzhen city[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(2): 151–160]
- [19] LIU Ya, LI Yan, LI Shuangcheng, et al. Spatial and temporal patterns of global NDVI trends: correlations with climate and human factors [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(10): 13233–13250.
- [20] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J]. *Science*, 1997, **277**(5325): 494–499.
- [21] 杨钰杰, 白晓永, 谭秋, 等. 1982–2015 年“一带一路”地区 NDVI 时空演变规律及其影响因素[J]. *山地学报*, 2020, **38**(2): 252–264. [YANG Yujie, BAI Xiaoyong, TAN Qiu, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of NDVI and its influencing factors in the “Belt and Road” region from 1982 to 2015 [J]. *Mountain Research*, 2020, **38**(2): 252–264]
- [22] GIBBS H K, RUESCH A S, ACHARD F, et al. Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2010, **107**(38): 16732–16737.
- [23] PENDRILL F, PERSSON U M. Combining global land cover datasets to quantify agricultural expansion into forests in Latin America: limitations and challenges [J]. *Plos One*, 2017, **12**(7): e181202.
- [24] MISHRA N B, CREWS K A, NEETI N, et al. MODIS derived vegetation greenness trends in African Savanna: deconstructing and localizing the role of changing moisture availability, fire regime and anthropogenic impact[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, **169**: 192–204.
- [25] 吕妍, 张黎, 闫慧敏, 等. 中国西南喀斯特地区植被变化时空特征及其成因[J]. *生态学报*, 2018, **38**(24): 8774–8786.

- [LÜ Yan, ZHANG Li, YAN Huimin, et al. Spatial and temporal patterns of changing vegetation and the influence of environmental factors in the Karst Region of Southwest China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(24): 8774 – 8786]
- [26] MENG Meng, HUANG Ni, WU Mingquan, et al. Vegetation change in response to climate factors and human activities on the Mongolian Plateau[J]. *PeerJ*, 2019, **7**: e7735.
- [27] PIAO Shilong, WANG Xuhui, PARK T, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, **1**: 14 – 27.
- [28] ZHAO Lin, DAI Aiguo, DONG Bo. Changes in global vegetation activity and its driving factors during 1982 – 2013[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2018, **249**: 198 – 209.
- [29] LI Jianguo, YU Shiyong, LIU Lili. Determining the dominant factors determining the variability of terrestrial ecosystem productivity in China during the last two decades[J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **31**(15): 2131 – 2145.
- [30] ISHTIAQUE A, SHRESTHA M, CHHETRI N. Rapid urban growth in the Kathmandu Valley, Nepal: monitoring land use land cover dynamics of a Himalayan City with landsat imageries[J]. *Environments*, 2017, **4**(4): 1 – 16.
- [31] THAPA R B, MURAYAMA Y. Scenario based urban growth allocation in Kathmandu Valley, Nepal[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2012, **105**(1 – 2): 140 – 148.
- [32] GAUTAM A P, SHIVAKOTI G P, WEBB E L. A review of forest policies, institutions, and changes in the resource condition in Nepal[J]. *The International Forestry Review*, 2004, **6**(2): 136 – 148.
- [33] CHAKRABORTY T, KAR R, GHOSH P, et al. Kosi megafan: historical records, geomorphology and the recent avulsion of the Kosi River[J]. *Quaternary International*, 2010, **227**(2): 143 – 160.
- [34] PAUDEL B, GAO Jungang, ZHANG Yili, et al. Changes in cropland status and their driving factors in the Koshi River Basin of the Central Himalayas, Nepal[J]. *Sustainability*, 2016, **8**(9): 1 – 17.
- [35] SHRESTHA A B, BAJRACHARYA S R, SHARMA A R, et al. Observed trends and changes in daily temperature and precipitation extremes over the Koshi River Basin 1975 – 2010[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, **37**(2): 1066 – 1083.
- [36] SIANTURI R, JETTEN V G, SARTOHADI J. Mapping cropping patterns in irrigated rice fields in West Java: towards mapping vulnerability to flooding using time-series MODIS imageries[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2018, **66**: 1 – 13.
- [37] UDDIN K, SHRESTHA H L, MURTHY M S R, et al. Development of 2010 national land cover database for the Nepal[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, **148**: 82 – 90.
- [38] 李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨[J]. *第四纪研究*, 2008, **28**(4): 535 – 543. [LI Bingyuan, PAN Baotian, HAN Jiafu. Basic terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions[J]. *Quaternary Sciences*, 2008, **28**(4): 535 – 543]
- [39] 龙晓君, 李小建. 基于多源数据的中国地形海拔分级指标调整研究[J]. *地理科学*, 2017, **37**(10): 1577 – 1584. [LONG Xiaojun, LI Xiaojian. Mountain attitude classification indexes adjustment based on multi-source data in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2017, **37**(10): 1577 – 1584]
- [40] 汤国安, 宋佳. 基于 DEM 坡度图制图中坡度分级方法的比较研究[J]. *水土保持学报*, 2006, **20**(2): 157 – 160. [TANG Guoan, SONG Jia. Comparison of slope classification methods in slope mapping from DEMs[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, **20**(2): 157 – 160]
- [41] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 1 – 593. [TANG Guoan, YANG Xin. ArcGIS: Spatial analysis experiment course of geographical information system[M]. Beijing: Science Press, 2012: 1 – 593]
- [42] LIU Laibao, WANG Yang, YOU Nanshan, et al. Changes in aridity and its driving factors in China during 1961 – 2016[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**(1): 50 – 60.
- [43] 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.
- [44] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Charles Griffin, 1948.
- [45] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245 – 259.
- [46] 乔伟峰, 盛业华, 方斌, 等. 基于转移矩阵的高度城市化区域土地利用演变信息挖掘——以江苏省苏州市为例[J]. *地理研究*, 2013, **32**(8): 1497 – 1507. [QIAO Weifeng, SHENG Yehua, FANG Bin, et al. Land use change information mining in highly urbanized area based on transfer matrix: a case study of Suzhou, Jiangsu Province[J]. *Geographical Research*, 2013, **32**(8): 1497 – 1507]
- [47] 朱会义, 李秀彬. 关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J]. *地理学报*, 2003, **58**(5): 643 – 650. [ZHU Huiyi, LI Xiubin. Discussion on the index method of regional land use change[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(5): 643 – 650]
- [48] 孙晓鹏, 王天明, 寇晓军, 等. 黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析[J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(6): 511 – 521. [SUN Xiaopeng, WANG Tianming, KOU Xiaojun, et al. Normalized difference vegetation index dynamic change and its driving factor analysis with long time series in the Jinghe River watershed on the Loess Plateau of China[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, **36**(6): 511 – 521]

- [49] UDDIN K, MURTHY M S R, WAHID S M, et al. Estimation of soil erosion dynamics in the Koshi Basin using GIS and remote sensing to assess priority areas for conservation [J]. Plos One, 2016, **11**(3): e150494.
- [50] HUSSAIN A, RASUL G, MAHAPATRA B, et al. Household food security in the face of climate change in the Hindu-Kush Himalayan region [J]. Food Security, 2016, **8**: 921–937.
- [51] BHATTARAI K, CONWAY D, YOUSEF M. Determinants of deforestation in Nepal's Central development region [J]. Journal of Environmental Management, 2009, **91**(2): 471–488.
- [52] DULL R A. Evidence for forest clearance, agriculture, and human-induced erosion in precolumbian El Salvador [J]. Annals of the Association of American Geographers, 2007, **97**(1): 127–141.
- [53] AMBIKA A K, WARDLOW B, MISHRA V. Remotely sensed high resolution irrigated area mapping in India for 2000 to 2015 [J]. Scientific Data, 2016, **3**: 160118.
- [54] BANIYA B, TANG QiuHong, HUANG Zhongwei, et al. Spatial and Temporal Variation of NDVI in Response to Climate Change and the Implication for Carbon Dynamics in Nepal [J]. Forests, 2018, **9**(6): 329.
- [55] BANIYA B, TANG QiuHong, POKHREL Y, et al. Vegetation dynamics and ecosystem service values changes at national and provincial scales in Nepal from 2000 to 2017 [J]. Environmental Development, 2019, **32**: 100464.
- [56] 张德铨, 李兰晖, 丁明军, 等. 新世纪以来青藏高原绿度变化及动因 [J]. 自然杂志, 2017, **39**(3): 173–178. [ZHANG Yili, LI Lanhui, DING Mingjun, et al. Greening of the Tibetan Plateau and its drivers since 2000 [J]. Chinese Journal of Nature, 2017, **39**(3): 173–178]
- [57] SHEN Miaogen, ZHANG Gengxin, CONG Nan, et al. Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai–Tibetan Plateau [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **189–190**: 71–80.
- [58] MISHRA N B, MAINALI K P. Greening and browning of the Himalaya: spatial patterns and the role of climatic change and human drivers [J]. Science of The Total Environment, 2017, **587–588**: 326–339.
- [59] HUSSAIN A, RASUL G, MAHAPATRA B, et al. Climate change-induced hazards and local adaptations in agriculture: a study from Koshi River Basin, Nepal [J]. Natural Hazards, 2018, **91**: 1365–1383.

Temporal and Spatial Changes in the Vegetation Coverage of the Koshi River Basin and Associated Land Use Changes

AI Jiahui¹, DING Mingjun^{1,2*}, ZHANG Hua^{1,2}, ZHANG Huamin¹, WANG Beibei¹

(1. School of Geography and Environment, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. Key Laboratory of Poyang Lake Wetland and Watershed Research Ministry of Education, Nanchang 330022, China)

Abstract: As an important part of terrestrial ecosystem, the dynamic change of vegetation is of great significance for quantitative assessment of regional ecological environment quality. In this research, it took a typical cross-border river basin—the Koshi River Basin as an example for NDVI analysis, based on MODIS-NDVI and land use data from 2000 to 2017, Mann-Kendall statistical test and Sen's trend test were used to analyze the temporal and spatial evolution of vegetation cover in this area and to investigate the change of land utilization in context. The results showed: (1) The spatial distribution of vegetation NDVI in the Koshi River Basin was significantly different, and the NDVI value presented a bimodal structure; (2) From 2000 to 2017, the vegetation NDVI in the Koshi River Basin showed an overall trend of increase, but there was a certain spatial differentiation. On a regional scale, the vegetation in China, India and Nepal were all on the rise, but they existed difference in variation range, manifested as India > Nepal > China; On a pixel scale, the areas with vegetation improvement accounted for 87.74% of the whole targeted area, mainly distributed in the central region of China, the central and southern regions of Nepal and parts of India; The areas where NDVI inclined to decrease accounted for 12.26%, mainly concentrated in

Kathmandu and areas along major roads and rivers in Nepal; (3) The variation trend of vegetation was significantly correlated with topographic factors (elevation, slope gradient and aspect), and its spatial distribution showed obvious terrain-guided pattern; (4) The areas with significant vegetation change were highly consistent with the areas with land use changes. The conversion of bare land and water bodies led to an increase in local vegetation cover; The conversion of cultivated land and woodland led to a decrease in local vegetation cover. The results of this study can provide a certain reference for the formulation of policies for land use in the Koshi River Basin, for the protection and construction of ecological environment, vegetation restoration and sustainable development.

Key words: vegetation; NDVI; land use; Koshi River Basin