

引用格式: 杨伟, 王根绪, 李阳, 王志伟. 三江源草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析[J]. 山地学报, 2024, 42(2): 143-153.

YANG Yi, WANG Genxu, LI Yang, WANG Zhiwei. Spatial-temporal changes in the critical vegetation coverage of grasslands with function of soil-water conservation, wind-breaking and sand-fixing in the Three-Rivers Headwater Region, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(2): 143-153.

三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化分析

杨伟^{1,2}, 王根绪^{1*}, 李阳¹, 王志伟^{1,2}

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 三江源区是中国重要的生态安全屏障, 其水土保持与防风固沙功能对中国及其周边地区生态安全具有重大意义。水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度是三江源草地生态保护与恢复的关键指标, 但其变化尚不明确。本研究利用修正通用土壤流失方程(RUSLE)和修正通用土壤风蚀方程(RWEQ)模拟了1979—2018年三江源区草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度并分析了其时空变化。结果表明: (1) 近40年来, 三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度东南高、西北低, 多年平均值为 $12.21\% \pm 1.42\%$, 年增长率为 0.30% ($P < 0.01$)。 (2) 防风固沙功能临界植被覆盖度西北高、东南低, 多年平均值为 $39.84\% \pm 11.94\%$, 有不显著增长趋势。 (3) 水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度西北高、东南低, 多年平均值为 $45.38\% \pm 10.04\%$, 年增长率为 0.32% ($P < 0.05$), 变化范围为 $11.73\% \sim 58.56\%$ 。三江源区西北部水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度大于 50% , 西南大部分区域不超过 40% 。 (4) 水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度在长江源区和黄河源区东北部呈下降趋势, 其中黄河源东北部下降趋势显著 ($P < 0.01$), 在黄河源区南部和澜沧江源区呈显著上升趋势 ($P < 0.01$)。本研究结果可为三江源生态环境保护以及高寒草地多目标管理提供科学依据与数据支撑。

关键词: 临界植被盖度; 生态阈值; 生态恢复; 高寒草地; 三江源

中图分类号: X36

文献标志码: A

三江源地处青藏高原腹地, 是中国重要的生态安全屏障^[1], 其水土保持与防风固沙功能对中国及其周边地区生态安全具有重大意义。三江源地区(Three-Rivers Headwater Region, TRHR)具有典型的高寒草地植被系统, 拥有丰富的水草资源^[2]。受高寒气候控制, 三江源区生态环境脆弱, 生态恢复力差^[3]。在全球环境变化和人为因素的影响下, 三江源草地持续退化^[4-5], 生态环境问题日益

突出。合理利用和保护该地区植被对当地及周边区域的生态-社会-经济系统可持续发展具有重大意义^[6]。中国实施三江源生态环境保护和建设工程^[7-9], 在三江源草地多功能管理目标当中, 水土保持与防风固沙的生态价值量占比达 78% ^[2], 确定水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度, 是三江源草地多维度、多目标、系统性管理的重要部分之一。

收稿日期(Received date): 2024-01-30; 改回日期(Accepted date): 2024-04-11

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金联合基金项目(U2240226); 国家重点研发计划(2022YFC3201702) [Joint Fund of National Natural Science Foundation of China(U2240226); National Key Research and Development Program of China(2022YFC3201702)]

作者简介(Biography): 杨伟(1995-), 女, 河北邯郸人, 博士研究生, 主要研究方向: 区域可持续发展。[YANG Yi (1995-), female, born in Handan, Hebei province, Ph.D. candidate, research on regional sustainable development] E-mail: yangyi956@imde.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 王根绪(1965-), 男, 甘肃天水人, 博士, 研究员, 主要研究方向: 生态水文学。[WANG Genxu (1965-), male, born in Tianshui, Gansu province, Ph.D., professor, research on ecohydrology] E-mail: wanggx@imde.ac.cn

在防风固沙与生态承载力研究中^[10-11],植被覆盖度是测度草地维持水土保持与防风固沙功能的关键指标。植被覆盖度与水土流失量之间存在显著的负相关关系^[12-14];不同植被条件下,土壤风蚀效力均随植被覆盖度的增加而增加^[15]。

临界植被覆盖度 (Critical Vegetation Coverage, CVC) 是指在一定区域内,草地或林地植被使土壤侵蚀降低到最大允许侵蚀量以内所需的最小植被覆盖度^[16]。临界植被覆盖度属于生态阈值的一种,低于临界值草地水土保持和防风固沙功能将受到破坏。对于典型温带草原而言,防风固沙与水土保持临界植被覆盖度是草地资源利用阈值^[17]。三江源生态环境脆弱,草地管理以保护与恢复为主,部分区域兼顾畜牧业,因此对于三江源典型高寒草地而言,临界植被覆盖度既是草地资源利用的生态红线,更是三江源生态保护与恢复的关键指标,也是草地绿色承载力的间接体现^[18]。虽然三江源区水土保持与防风固沙功能因植被恢复得到了提升^[19-20],剧烈风蚀区面积减少^[21],然而三江源区临界植被覆盖度变化尚不明确。

本研究利用修正通用土壤流失方程和修正通用土壤风蚀方程的变式,模拟了三江源草地水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度,并分析其时空变化。研究结果可为三江源生态环境保护以及高寒草地多目标管理提供科学依据与数据支撑。

1 研究区概况

三江源区(73.45°~104.70°E,26.85°~39.96°N)平均海拔 4587 m,总面积约为 $3.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (图 1a)。受高原大陆性气候控制,日照时间长,辐射强度高,气温寒冷,有明显的干湿两季^[22]。植被类型以高寒草地为主,高寒草甸和高寒草原分别占整个区域的 57.71% 和 22.03%。三江源区冻土广泛发育,多年冻土占整个区域的 67%^[23]。因海拔较高,整个区域气候寒冷、干燥,导致三江源区植被生长缓慢,生态恢复能力弱,是典型的生态脆弱区^[24]。三江源区共包括 16 个县级行政单位以及唐古拉山镇(图 1b)。该地区人类活动以放牧为主,已有上千年历史,饲养规模达 1600 万个羊单位草食家畜^[25]。

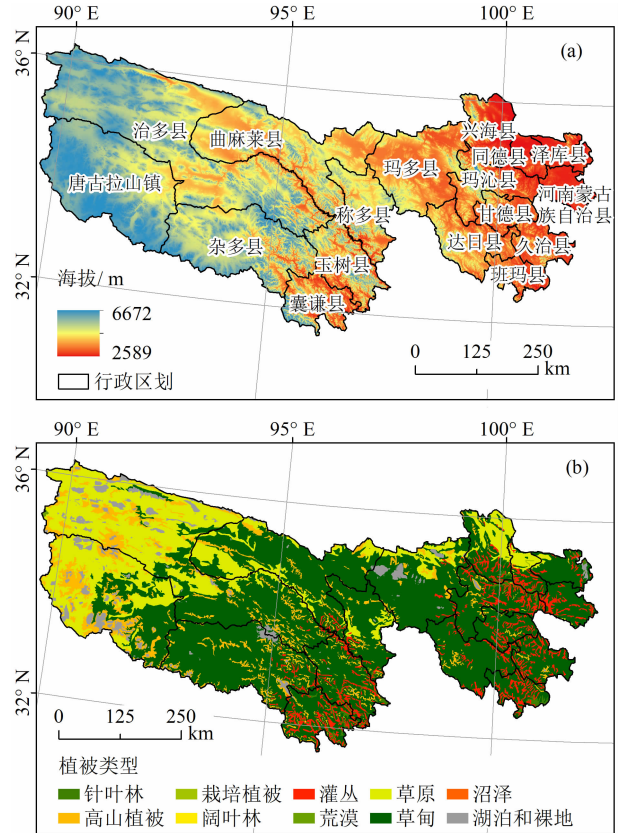


图 1 三江源区示意图:(a)行政区划;(b)植被类型

Fig. 1 Map of the Three-Rivers Headwater Region (TRHR) in China;

(a) administrative divisions; (b) vegetation types

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源及预处理

气候数据采用中国区域地面气象要素驱动数据集^[26],该数据集由国家青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn>)提供,时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 。本研究采用的气象要素包括气温、降水、风速、向下短波辐射,选用时段为 1979—2018 年。该数据集在三江源地区的可靠性已得到证实^[26]。土壤属性数据采用世界土壤数据库 (Harmonized World Soil Database version 1.1, HWSD v1.1),包括土壤有机碳、粘粒($<0.002 \text{ mm}$)、粉粒($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)和砂粒($0.05 \sim 2.00 \text{ mm}$)含量,该数据库空间分辨率为 $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ 。日积雪深度数据来源于中国雪深长时间序列数据集,空间分辨率为 25 km,选用时段为 1979—2018 年^[27]。数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 采用“青藏高原 SRTM DEM 数据 (2012)”,空间分辨率为

90 m。为保证数据分析的一致性,在进行计算之前,统一将栅格数据重采样至 $0.025^\circ \times 0.025^\circ$ 分辨率,重采样方法为双线性插值。

2.2 研究方法

2.2.1 水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度算法

水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度,是指生态系统抵御水力、风力侵蚀低于最大允许水土流失量时的最小植被覆盖度,是水土保持与防风固沙功能得以维持的阈值。草地可以同时支撑水土保持和防风固沙等功能,根据资源环境承载力的木桶效应^[28-29],水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度应为水土保持功能临界植被覆盖度与防风固沙功能临界植被覆盖度的最大值,植被覆盖度大于此临界值可同时满足草地水土保持与防风固沙功能,即:

$$CVC_{\max} = \max(CVC_{\text{water}}, CVC_{\text{wind}}) \quad (1)$$

式中, CVC_{\max} 为水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度; CVC_{water} 为水土保持功能临界植被覆盖度; CVC_{wind} 为防风固沙功能临界植被覆盖度。

2.2.2 水土保持功能临界植被覆盖度模拟

水土保持功能临界植被覆盖度采用修正通用土壤流失方程 (Revised Universal Soil Loss Equation, RUSLE) 进行模拟。通过设定最大允许侵蚀水平、植被覆盖因子与植被覆盖度之间的关系,得到允许土壤侵蚀水平下的植被覆盖度,即为水土保持功能临界植被覆盖度,计算公式^[30]如下:

$$C_{\text{water}} = \frac{A}{R \times K \times LS \times P} \quad (2)$$

式中, C_{water} 水土保持临界植被覆盖因子; A 为允许土壤侵蚀量; R 为降雨侵蚀力; K 为土壤可蚀性因子; LS 为坡长与坡度因子; P 为水保措施因子。本研究关注自然条件下的临界植被覆盖度,故 P 取 1。根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)^[30],本研究将最大允许土壤侵蚀量确定为发生微度侵蚀时的允许上限,即 $500 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,式中各因子计算过程详见文献[31]。

水土保持功能临界植被覆盖度与植被覆盖因子关系^[32]如下:

$$CVC_{\text{water}} = \begin{cases} 10^{\frac{0.6508 - C_{\text{water}}}{0.3436}}, & 0 < C_{\text{water}} < 1 \\ 0, & C_{\text{water}} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

2.2.3 防风固沙功能临界植被覆盖度模拟

防风固沙功能临界植被覆盖度模拟采用修正通用土壤风蚀方程 (Revised Wind Erosion Equation, RWEQ),通过设定最大允许土壤风蚀水平、植被覆盖因子与植被覆盖度之间的关系,得到最大允许土壤风蚀水平下的植被覆盖度,即为防风固沙功能临界植被覆盖度,计算公式^[31]如下:

$$C_{\text{wind}} = \frac{Q_{\max}}{109.8 \times WF \times EF \times SCF \times K'} \quad (4)$$

式中, C_{wind} 为植被覆盖因子; Q_{\max} 为土壤侵蚀最大转移量; WF 为气候因子; EF 为土壤侵蚀因子; SCF 为土壤结皮因子; K' 为地表粗度因子。根据《土壤侵蚀分类分级标准》(SL190—2007)^[30],本研究将最大允许土壤风蚀量确定为发生微度风蚀时的允许上限,即 $200 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,式中各因子计算过程详见文献[33]。

防风固沙功能临界植被覆盖度与植被覆盖因子关系^[30]如下:

$$CVC_{\text{wind}} = \frac{\ln C_{\text{wind}}}{-0.1151} \quad (5)$$

2.2.4 趋势分析及其检验

本研究采用单因子线性最小二乘法对临界植被覆盖度变化趋势进行分析,趋势显著性以 F 统计量检验。计算公式^[4]如下:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times CVC_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n CVC_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (6)$$

式中, slope 为增长率; CVC_i 为第 i 年临界植被覆盖度; n 为时间序列总长。 $\text{slope} > 0$ 代表增长趋势, $\text{slope} < 0$ 代表下降趋势。

3 结果分析

3.1 水土保持功能临界植被覆盖度时空变化

受地形、土壤、降水等因素共同作用,三江源区草地 1979—2018 年多年平均水土保持功能临界植被覆盖度由东南向西北逐渐递减(图 2a),变化范围为 0 ~ 68.52%。三江源区西部及西北部草地水土保持功能临界植被覆盖度仅 10%,澜沧江源区、黄河源区东南草地水土保持功能临界被覆盖度较高,其中澜沧江源区杂多县东南区域及囊谦县、黄河源区玛沁县大部分区域草地水土保持功能临界植被覆盖

度大于 40%, 久治县、班玛县以及河南蒙古族自治县大部分区域草地水土保持功能临界植被覆盖度大于 50%。

1979—2018 年三江源区草地平均水土保持功能临界植被覆盖度呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), 年增长率为 0.30% (图 2b)。近 40 年, 三江源区草地平均水土保持功能临界植被覆盖度为 $12.21\% \pm 1.42\%$, 波动幅度较小, 年际波动范围为 5.22% ~ 22.11%。1993—1999 年, 三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度连续增加。近 40 年间, 区域平均水土保持功能临界植被覆盖度 1991 年最低, 2014 年最高。

1979—2018 年, 三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度变化呈西北下降、东南上升的格局 (图 3)。长江源区及黄河源上游区域呈轻微下降趋

势, 下降趋势不显著。澜沧江源区及黄河源下游区域呈增长趋势, 年增长率大于三江源区草地区域平均水土保持功能临界植被覆盖度年增长率。黄河源下游区域同德县、玛沁县、兴海县及泽库县草地水土保持功能临界植被覆盖度增长趋势显著 ($P < 0.01$)。

3.2 防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化

三江源区草地 1979—2018 年多年平均防风固沙功能临界植被覆盖度西北高、东南低, 变化范围为 0 ~ 65.99%, 长江源区草地防风固沙功能临界植被覆盖度明显高于黄河源区与澜沧江源区 (图 4a)。长江源大部分区域与黄河源上游玛多县草地防风固沙功能临界植被覆盖度大于 40%, 其中可可西里地区防风固沙功能临界植被覆盖度高达 60%。澜沧江源区与黄河源下游区域防风固沙功能临界植被覆

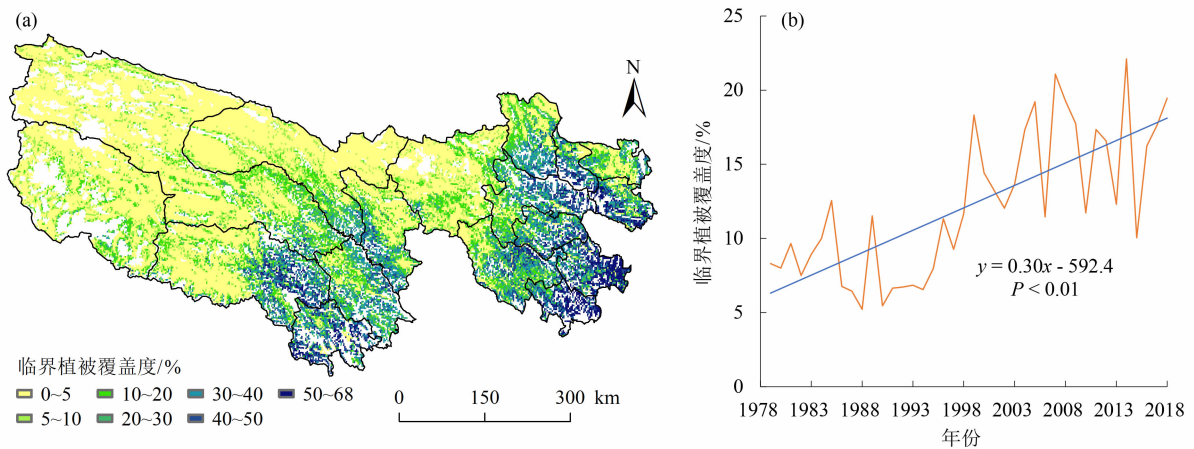


图 2 1979—2018 年三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度: (a) 空间分布; (b) 年际变化

Fig. 2 CVC for soil-water conservation in TRHR from 1979 to 2018:

(a) spatial distribution; (b) interannual variation

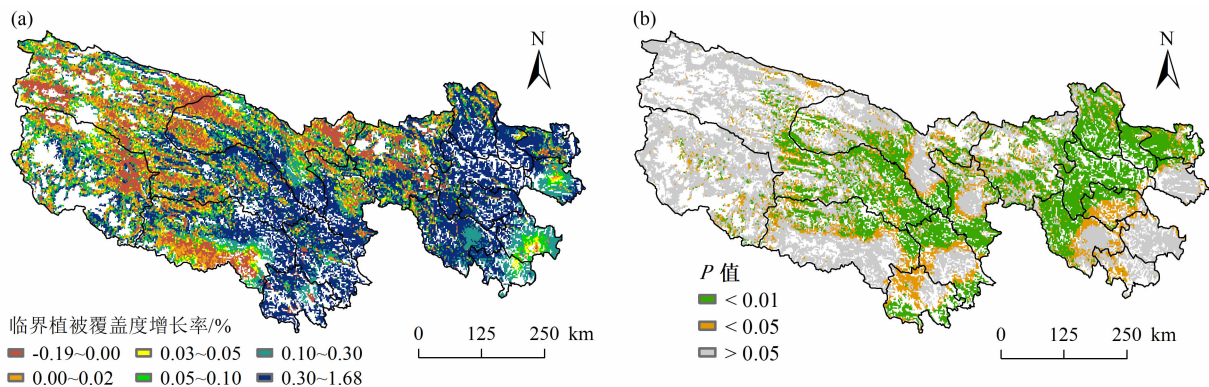


图 3 1979—2018 年三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度变化趋势: (a) 增长率; (b) 显著性

Fig. 3 Trends in the CVC for soil-water conservation in TRHR from 1979 to 2018:

(a) growth rate; (b) significance of the trends

盖度不超过 20%。三江源大部分区域防风固沙功能临界植被覆盖度低于 70%，仅治多县与唐古拉山镇交界处大于 70%。1979—2018 年三江源草地区域平均防风固沙功能临界植被覆盖度呈增加趋势，年增长率为 0.25% ($P=0.14$)，多年平均值为 $39.84\% \pm 11.94\%$ ，波动幅度较大(图 4b)，年际波动范围为 8.30% ~ 56.58%。

1979—2018 年三江源区草地防风固沙功能临界植被覆盖度变化趋势呈西部及东北部下降、南部及东南部上升的模式(图 5)。唐古拉山镇、治多县中部、黄南地区均呈下降趋势，其中同德县、泽库县及兴海县下降趋势显著($P < 0.05$)，在整个研究区内该区域下降率最大，年下降率大于 0.2%。三江源区南部草地防风固沙功能临界植被覆盖度呈增长趋势，其中，杂多县增长趋势显著($P < 0.05$)，年增

长率大于 0.6%。

3.3 水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度时空变化

三江源区草地 1979—2018 年多年平均水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度为 $45.38\% \pm 10.04\%$ ，呈西高东低分布，长江源区水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度明显高于黄河源区与澜沧江源区(图 6a)。长江源区水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度大于 50%，澜沧江源区与黄河源区小于 40%。长江源区唐古拉山镇北部及治多县西北部草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度大于 70%。1979—2018 年三江源区草地区域平均水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈显著增加趋势，年增长率为 0.32%，波动幅度较大，低值出现在 1986 年、1998 年和 2012 年，高值出现在

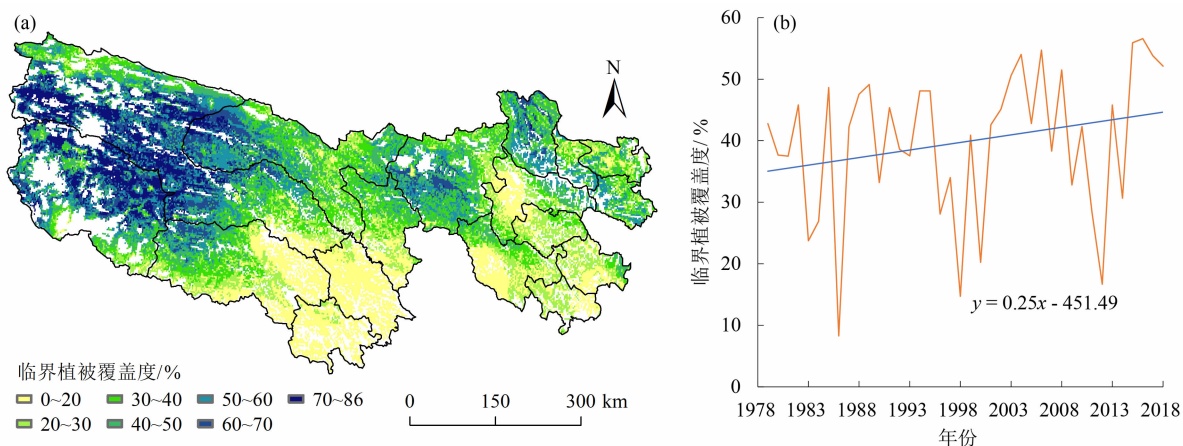


图 4 1979—2018 年三江源区草地防风固沙功能临界植被覆盖度:(a) 空间分布;(b) 年际变化

Fig. 4 CVC for wind-breaking and sand-fixing in TRHR from 1979 to 2018;

(a) spatial distribution; (b) interannual variation

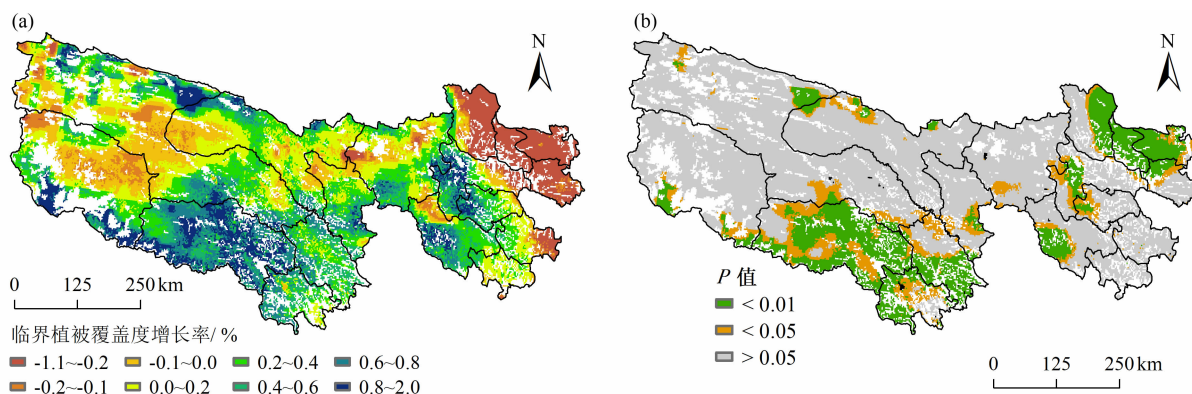


图 5 1979—2018 年三江源区草地防风固沙功能临界植被覆盖度变化趋势:(a) 增长率;(b) 显著性

Fig. 5 Trends in the CVC for wind-breaking and sand-fixing in TRHR from 1979 to 2018;

(a) growth rate; (b) significance of the trends

2017 年,年际波动范围为 11.72%~58.56% (图 6b)。

1979—2018 年三江源区北部草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈下降趋势,南部呈增长趋势(图 7)。唐古拉山镇、治多县中部、兴海县与泽库县草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈下降趋势,其中,兴海县与泽库县下降趋势较大,年下降率大于 0.32%,下降趋势显著($P < 0.01$)。杂多县、玉树县、囊谦县、达日县、玛沁县及甘德县草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度上升趋势显著($P < 0.01$)。

4 讨论

本研究对三江源区草地临界植被覆盖度变化的影响因素及同步性进行探讨。三江源区草地水土保

持与防风固沙功能临界植被覆盖度受气候、地形及土壤物理属性的共同影响^[9, 34],土壤与地形因素的时间变化性远低于气候因素^[35],因此临界植被覆盖度时间变化以气候因素为主导^[36-38]。近 40 年来,三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度呈显著上升趋势,这是由于三江源区降水量增加且集中度变强^[39],造成侵蚀性降雨强度增加,进而造成了水土保持功能临界植被覆盖度的增加。三江源区水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈显著上升趋势,而防风固沙功能植被覆盖度增加趋势不显著,说明三江源区水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度的时间变化主要受水土保持功能临界植被覆盖度变化的影响。结合三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度空间分布发现,其低值区呈下降趋势、高值区呈显著上升趋势,说明高值区(东南区域)潜在

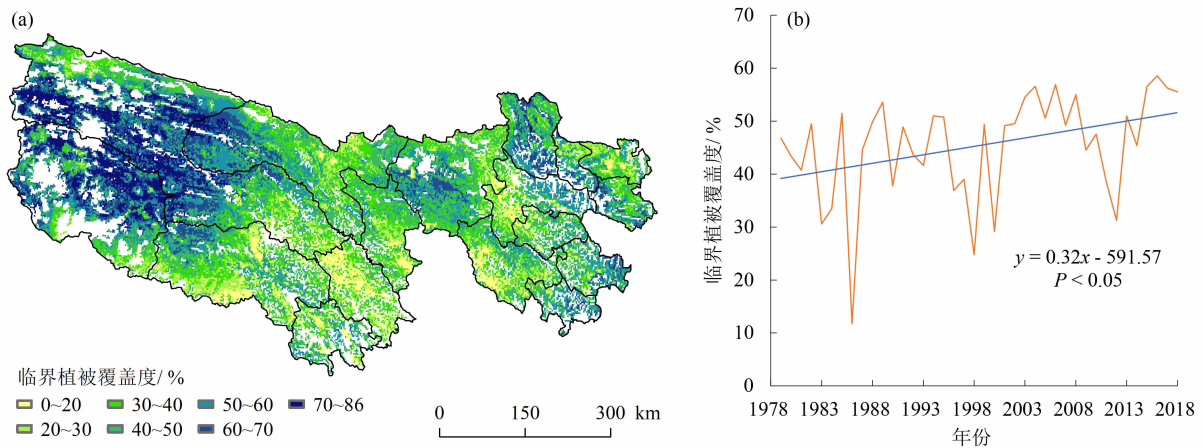


图 6 1979—2018 年三江源区草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度:(a) 空间分布;(b) 年际变化

Fig. 6 CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing in TRHR from 1979 to 2018;

(a) spatial distribution; (b) interannual variation

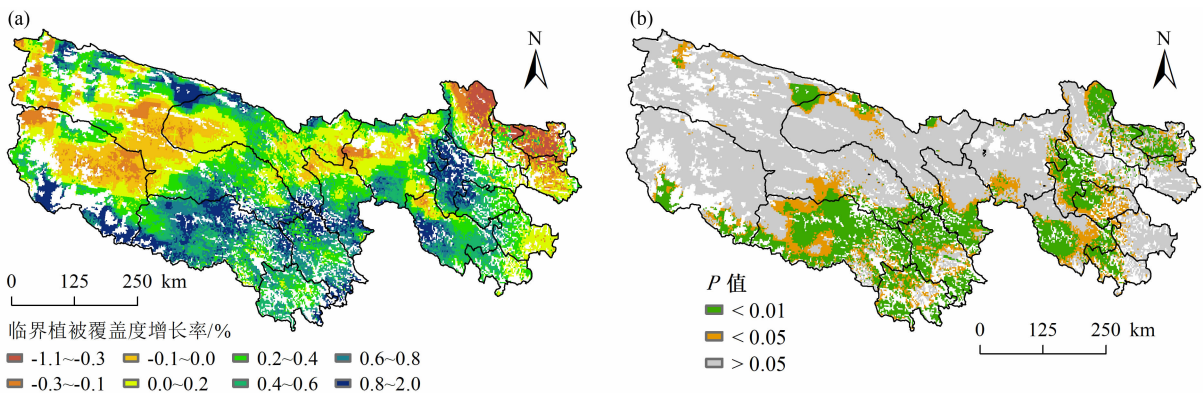


图 7 1979—2018 年三江源区草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度变化趋势:(a) 增长率;(b) 显著性

Fig. 7 Trends in CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing in TRHR from 1979 to 2018;

(a) growth rate; (b) significance of the trends

侵蚀水平逐步增加。据前人研究结果,三江源东南区域降水量呈增加趋势^[40],降雨侵蚀力增加。三江源区东南大部分区域实际植被覆盖度^[41]高于临界植被覆盖度,河道两侧或坡度较大区域低于临界值,说明应对河流干道两侧及坡度较大区域加强植被恢复措施。

为支撑三江源区草地生态恢复与保护工程,本研究以行政区划为单位对临界植被覆盖度与植被覆盖度现状进行对比。三江源区内,唐古拉山镇与治多县草地水土保持及防风固沙临界植被覆盖度最高(图8),该区域属三江源区风蚀最严重区^[33],与可可西里自然保护区重叠,环境恶劣,实际植被覆盖度低于40%^[42],可可西里部分地区实际植被覆盖度甚至低于20%,说明该地区自然状态难以维持水土保持与防风固沙功能,植被退化趋势还未得到根本遏制。值得注意的是,唐古拉山镇与治多县中部区域水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈下降趋势,这可能是由于气候变化引起风蚀力的减弱。兴海县与班玛县草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度仅次于唐古拉山镇与治多县,兴海县临界植被覆盖度呈显著下降趋势且防风固沙功能临界植被覆盖度略高于水土保持功能临界植被覆盖度,班玛县反之。

根据临界植被覆盖度变化分析结果,结合现实水热条件,对不同草地类型制定相应的植被恢复阈

值。据统计,三江源区高寒草甸、草原水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度分别为 $41.87\% \pm 15.45\%$ 和 $54.56\% \pm 16.06\%$ 。对比毛乌素沙地水土流失盖度临界值 45% ^[19],高寒草甸临界植被覆盖度较低、高寒草原临界植被覆盖度较高。除降水、风速、温度等气候条件的影响外,植被类型、形态、单株生物量也是影响温带草原及高寒草原水土保持与防风固沙临界植被覆盖度差异的潜在因素^[43]。三江源区高寒草甸水热条件较好^[44],植被覆盖度受放牧影响较高,在未退化区植被覆盖度可以满足临界植被覆盖度,而退化草甸维持水土保持与防风固沙功能则植被覆盖度至少需恢复到42%。高寒草原水热条件较差,部分区域植被生产潜力不足以达到55%的临界阈值,因此高寒草原植被恢复阈值应从实际出发制定较低标准,并对重点区域采取防风固沙的必要措施。

水土保持与防风固沙功能临界植被覆盖度变化的驱动力具有空间异质性。三江源东南区域(黄河源区东南部与澜沧江源区)草地水土保持功能临界植被覆盖度高于防风固沙功能临界植被覆盖度,说明该区域水力侵蚀较强,区域治理应以水土保持措施为主。西北区域(黄河源区西北部与长江源区)草地水土保持功能临界植被覆盖度低于防风固沙功能临界植被覆盖度,长江源区及以玛多县为核心区的黄河源上游区域草地管理应以保土固沙措施为主。此外,三江源区冻土广布,季节性冻土与水力侵蚀区高度重合,且三江源区雨热同期,活动层冻土融化为水力侵蚀提供了更多的物质来源,加重了土壤流失,使该地区的水文状况更为复杂化,增加了该地区环境治理和生态恢复的难度。

5 结论

(1)单一生态功能临界植被覆盖度模拟结果显示:1979—2018年,三江源区草地水土保持功能临界植被覆盖度东南高、西北低,多年平均值为 $12.21\% \pm 1.42\%$,年增长率为 0.30% ($P < 0.01$)。防风固沙功能临界植被覆盖度西北高、东南低,多年平均值为 $39.84\% \pm 11.94\%$,有不显著增长趋势,年增长率为 0.25% 。

(2)多生态功能临界植被覆盖度模拟结果显示:

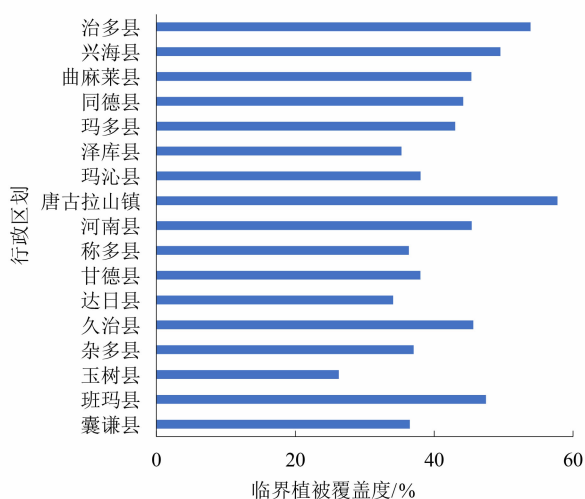


图8 三江源区各县、镇平均草地水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度

Fig. 8 Average CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing in the counties in TRHR

三江源区草地平均水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈西北高、东南低分布,多年平均值为 $45.38\% \pm 10.04\%$,变化范围为 $11.73\% \sim 58.56\%$ 。三江源区西北部水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度需达 50% 以上,西南大部分区域不超过 40%。

(3)多生态功能临界植被覆盖度时间变化显示:1979—2018 年,三江源草地区域平均水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度呈上升趋势,年增长率为 0.32%,这与三江源区降水量的增加关系密切。空间上,水土保持及防风固沙功能临界植被覆盖度在长江源区和黄河源区东北部呈下降趋势,其中黄河源区东北部下下降趋势显著($P < 0.01$);在黄河源区南部和澜沧江源区呈显著上升趋势($P < 0.01$)。

本研究认为三江源区草地多功能、多维度管理不仅应在不同生态功能间做出权衡,还应依据临界植被覆盖度分区管理。现阶段,三江源区西北部(唐古拉山镇与治多县西北部)生态功能修复与环境保护应列为草地可持续发展的首要任务。本研究可为三江源区草地生态保护与恢复提供科学依据与数据支撑。

参考文献(References)

- [1] 傅伯杰, 欧阳志云, 施鹏, 等. 青藏高原生态安全屏障状况与保护对策[J]. 中国科学院院刊, 2021, **36**(11): 1298 – 1306. [FU Bojie, OUYANG Zhiyun, SHI Peng, et al. Current condition and protection strategies of Qinghai-Tibet Plateau ecological security barrier [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2021, **36**(11): 1298 – 1306] DOI: 10.16418/j.issn.1000 – 3045.20210919001
- [2] 赵新全. 三江源草地多功能协同提升的科学问题及实践[J]. 民主与科学, 2023(5): 27 – 32. [ZHAO Xinquan. Scientific issues and practice on multi-functional collaborative improvement of the grasslands in the Three Rivers Source Region [J]. Democracy and Science, 2023(5): 27 – 32]
- [3] 韦晶, 郭亚敏, 孙林, 等. 三江源地区生态环境脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015, **34**(7): 1968 – 1975. [WEI Jing, GUO Yamin, SUN Lin, et al. Evaluation of ecological environment vulnerability for Sanjiangyuan area [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(7): 1968 – 1975] DOI: 10.13292/j.1000 – 4890.20150615.007
- [4] 李辉霞, 刘国华, 傅伯杰. 基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究[J]. 生态学报, 2011, **31**(19): 5495 – 5504. [LI Xiahui, LIU Guohua, FU Bojie. Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, **31**(19): 5495 – 5504]
- [5] 刘纪远, 徐新良, 邵全琴. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征[J]. 地理学报, 2008, **63**(4): 364 – 376. [LIU Jiyuan, XU Xinliang, SHAO Quanqin. The spatial and temporal characteristics of grassland degradation in the Three-River Headwaters region in Qinghai province [J]. Acta Geographica Sinica, 2008, **63**(4): 364 – 376] DOI: 10.11821/xb200804001
- [6] 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征[J]. 地理研究, 2010, **29**(8): 1439 – 1451. [SHAO Quanqin, ZHAO Zhiping, LIU Jiyuan, et al. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the source region of three rivers on Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years [J]. Geographical Research, 2010, **29**(8): 1439 – 1451] DOI: 10.11821/yj2010080009
- [7] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文. 三江源生态工程的生态成效评估与启示[J]. 自然杂志, 2013, **35**(1): 40 – 46. [LIU Jiyuan, SHAO Quanqin, FAN Jiangwen. Ecological construction achievements assessment and its revelation of ecological project in Three Rivers Headwaters Region [J]. Chinese Journal of Nature, 2013, **35**(1): 40 – 46] DOI: 10.3969/j.issn.0253 – 9608.2013.01.005
- [8] 徐新良, 王靓, 李静, 等. 三江源生态工程实施以来草地恢复态势及现状分析[J]. 地球信息科学学报, 2017, **19**(1): 50 – 58. [XU Xinliang, WANG Liang, LI Jing, et al. Analysis of the grassland restoration trend and degradation situation in the “Three-River headwaters” region since the implementation of the ecological project [J]. Journal of Geo-information Science, 2017, **19**(1): 50 – 58] DOI: 10.3724/SP.J.1047.2017.00050
- [9] SHAO Quanqin, CAO Wei, FAN Jiangwen, et al. Effects of an ecological conservation and restoration project in the Three-River Source Region, China [J]. Journal of Geographical Sciences, 2017, **27**(2): 183 – 204. DOI: 10.1007/s11442 – 017 – 1371 – y
- [10] 杨伟. 青藏高原高寒草地生态承载力研究[D]. 石家庄: 河北师范大学, 2019: 8 – 19. [YANG Yi. Study on ecological carrying capacity of alpine grassland on Qinghai-Tibet Plateau [D]. Shijiazhuang: Hebei Normal University, 2019: 8 – 19]
- [11] YANG Yi, WANG Genxu, LIN Shan, et al. How much aboveground net primary production can be used for human activities in the alpine grasslands in the Three Rivers Source Region (TRSR), China? [J]. Environmental Research Letters, 2022, **17**(9): 094047. DOI: 10.1088/1748 – 9326/ac8ec3
- [12] 胡静, 覃光华, 王瑞滢, 等. 不同坡度及植被覆盖度下的坡面流特性数值模拟[J]. 水土保持学报, 2022, **36**(3): 37 – 43. [HU Jing, QIN Guanghua, WANG Ruiying, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of overland flow under

- different slope and vegetation coverage [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(3): 37–43 DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2022.03.006
- [13] 胡梦甜, 张慧, 乔亚军, 等. 呼伦贝尔森林-草原生态交错带土壤风蚀量时空变化及驱动力分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2023, **39**(8): 999–1007. [HU Mengtian, ZHANG Hui, QIAO Yajun, et al. Spatio-temporal change and driving forces of soil wind erosion amount in Hulunbuir forest-steppe ecotone [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2023, **39**(8): 999–1007 DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2022.0253
- [14] 马云飞, 许翔驰, 马艳敏, 等. 长白山地区土壤水蚀时空演变特征及驱动因素分析[J]. *节水灌溉*, 2024(4): 78–85. [MA Yunfei, XU Xiangchi, MA Yanmin, et al. Temporal and spatial evolution of soil erosion and its driving factors in Changbai Mountain area [J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(4): 78–85 DOI: 10.12396/jsjg.2023390
- [15] 赵晨光, 李青丰. 毛乌素沙地不同植被条件下的土壤风蚀效果[J]. *草原与草业*, 2014, **26**(2): 38–43. [ZHAO Chenguang, LI Qingfeng. Soil erosion feature under different vegetation in Mu Us Sandland [J]. *Grassland and Prataculture*, 2014, **26**(2): 38–43 DOI: 2095-5952(2014)02-0038-06
- [16] 张光辉, 梁一民. 论有效植被盖度[J]. *中国水土保持*, 1996(5): 28+46. [ZHANG Guanghui, LIANG Yimin. On effective vegetation cover [J]. *Soil and Water Conversation in China*, 1996(5): 28+46 DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.1996.05.010
- [17] 刘同海, 吴新宏, 吕世海, 等. 基于遥感的北方防风固沙区沙化草地利用基线盖度研究[J]. *农业工程学报*, 2013, **29**(3): 235–241. [LIU Tonghai, WU Xinhong, LYU Shihai, et al. Study on baseline vegetation coverage of desertification grassland in northern sand-fixing region based on remote sensing [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, **29**(3): 235–241 DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.03.031
- [18] 于慧, 王根绪, 杨燕, 等. 草地绿色承载力概念及其在国家公园中的应用框架[J]. *生态学报*, 2020, **40**(20): 7248–7254. [YU Hui, WANG Genxu, YANG Yan, et al. Concept of grassland green carrying capacity and its application framework in national park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(20): 7248–7254 DOI: 10.5846/stxb201906171276
- [19] 王雅琼, 刘彦, 阿彦, 等. 三江源植被保持土壤能力的时空变化[J]. *环境科学研究*, 2016, **29**(7): 1023–1031. [WANG Yaqiong, LIU Yan, A Yan, et al. Spatial and temporal variation of soil conservation capability of vegetation in Three River Headwaters Region [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, **29**(7): 1023–1031 DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2016.07.10
- [20] 赖锋, 乔占明, 熊增连. 青海省风蚀量及防风固沙量时空特征分析[J]. *测绘科学*, 2023, **48**(1): 148–156. [LAI Feng, QIAO Zhanming, XIONG Zenglian. Spatiotemporal characteristics of wind erosion and wind prevention and sand fixation in Qinghai province [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, **48**(1): 148–156 DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2023.01.017
- [21] TENG Yanmin, ZHAN Jinyan, LIU Wei, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Ecological Indicators*, 2021, **123**: 107340. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107340
- [22] 孟宪红, 陈昊, 李照国, 等. 三江源区气候变化及其环境影响研究综述[J]. *高原气象*, 2020, **39**(6): 1133–1143. [MENG Xianhong, CHEN Hao, LI Zhaoguo, et al. Review of climate change and its environmental influence on the Three-River Regions [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, **39**(6): 1133–1143 DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00144
- [23] 刘时银, 姚晓军, 郭万钦, 等. 基于第二次冰川编目的中国冰川现状[J]. *地理学报*, 2015, **70**(1): 3–16. [LIU Shiyin, YAO Xiaojun, GUO Wanqin, et al. The contemporary glaciers in China based on the Second Chinese Glacier Inventory [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(1): 3–16 DOI: 10.11821/dlxb201501001
- [24] 陈桂琛, 卢学峰, 彭敏, 等. 青海省三江源区生态系统基本特征及其保护[J]. *青海科技*, 2003(4): 14–17. [CHEN Guichen, LU Xuefeng, PENG Min, et al. Basic characteristics and protection of the ecosystem in the Three Rivers Source Area of Qinghai province [J]. *Qinghai Technology*, 2003(4): 14–17 DOI: 10.3969/j.issn.1005-9393.2003.04.004
- [25] 张良侠, 樊江文, 邵全琴, 等. 生态工程前后三江源草地产草量与载畜压力的变化分析[J]. *草业学报*, 2014, **23**(5): 116–123. [ZHANG Liangxia, FAN Jiangwen, SHAO Quanqin, et al. Changes in grassland yield and grazing pressure in the Three Rivers headwater region before and after the implementation of the eco-restoration project [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, **23**(5): 116–123 DOI: 10.11686/cyxb20140513
- [26] YANG Kun, HE Jie, TANG Wenjun, et al. On downward shortwave and longwave radiations over high altitude regions: Observation and modeling in the Tibetan Plateau [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(1): 38–46. DOI: 10.1016/j.agrformet.2009.08.004
- [27] DAI Liyun, CHE Tao, DING Yongjian, et al. Evaluation of snow cover and snow depth on the Qinghai-Tibetan Plateau derived from passive microwave remote sensing [J]. *The Cryosphere*, 2017, **11**(4): 1933–1948. DOI: 10.5194/tc-11-1933-2017
- [28] 于贵瑞, 张雪梅, 赵东升, 等. 区域资源环境承载力科学概念及其生态学基础的讨论[J]. *应用生态学报*, 2022, **33**(3): 577–590. [YU Guirui, ZHANG Xuemei, ZHAO Dongsheng, et al. Discussion on the scientific concepts of regional resources and environmental carrying capacity and its ecological basis [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, **33**(3): 577–590]

- DOI: 10.13287/j.1001-9332.202203.020
- [29] 赵东升, 张雪梅, 邓思琪, 等. 区域资源环境承载力的评价理论及方法讨论[J]. 应用生态学报, 2022, **33**(3): 591-602. [ZHAO Dongsheng, ZHANG Xuemei, DENG Siqi, et al. Evaluation theory and method of regional resources and environmental carrying capacity [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, **33**(3): 591-602] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202203.024
- [30] 中华人民共和国水利部水土保持司. 土壤侵蚀分类分级标准: SL 190—2007 [S]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2008: 1. [Department of Soil and Water Conservation, Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Standards for classification and gradation of soil erosion: SL 190—2007 [S]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008: 1]
- [31] TENG Hongfeng, LIANG Zongzheng, CHEN Songchao, et al. Current and future assessments of soil erosion by water on the Tibetan Plateau based on RUSLE and CMIP5 climate models [J]. Science of the Total Environment, 2018, **635**: 673-686. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.04.146
- [32] 蔡崇法, 丁树文, 史志华, 等. 应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J]. 水土保持学报, 2000, **14**(2): 19-24. [CAI Chongfa, DING Shuwen, SHI Zhihua, et al. Study of applying USLE and geographical information system IDRISI to predict soil erosion in small watershed [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, **14**(2): 19-24] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2000.02.005
- [33] 巩国丽, 刘纪远, 邵全琴. 基于 RWEQ 的 20 世纪 90 年代以来内蒙古锡林郭勒盟土壤风蚀研究[J]. 地理科学进展, 2014, **33**(6): 825-834. [GONG Guoli, LIU Jiyan, SHAO Quanqin. Wind erosion in Xilingol League, Inner Mongolia since the 1990s using the revised wind erosion equation [J]. Progress in Geography, 2014, **33**(6): 825-834] DOI: 10.11820/dlkxjz.2014.06.011
- [34] SHENG Wenping, ZHEN Lin, XIAO Yu, et al. Ecological and socioeconomic effects of ecological restoration in China's Three Rivers Source Region [J]. Science of the Total Environment, 2019, **650**: 2307-2313. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.09.265
- [35] SHAO Quanqin, ZHAO Zhiping, LIU Jiyan, et al. The characteristics of land cover and macroscopical ecology changes in the Source Region of Three Rivers in Qinghai-Tibet Plateau during last 30 years [C]// 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, July 25-30, 2010, Honolulu, HI, USA. New York: IEEE, 2010: 363-366. DOI: 10.1109/IGARSS.2010.5651314
- [36] XU Xingkun, CHEN Hong, LEVY J K. Spatiotemporal vegetation cover variations in the Qinghai-Tibet Plateau under global climate change [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, **53**(6): 915-922. DOI: 10.1360/csb2008-53-4-456
- [37] LI X Y, MA Y J, XU H Y, et al. Impact of land use and land cover change on environmental degradation in Lake Qinghai watershed, northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. Land Degradation and Development, 2009, **20**(1): 69-83. DOI: 10.1002/ldr.885
- [38] MA Shuai, WANG Liangjie, JIANG Jiang, et al. Threshold effect of ecosystem services in response to climate change and vegetation coverage change in the Qinghai-Tibet Plateau ecological shelter [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, **318**: 128592. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.128592
- [39] DONG Yiyang, ZHAI Jiaqi, ZHAO Yong, et al. Teleconnection patterns of precipitation in the Three-River Headwaters region, China [J]. Environmental Research Letters, 2020, **15**(10): 104050. DOI: 10.1088/1748-9326/aba8c0
- [40] DU Juan, YU Xiaojing, ZHOU Li, et al. Less concentrated precipitation and more extreme events over the Three River Headwaters Region of the Tibetan Plateau in a warming climate [J]. Atmospheric Research, 2024, **303**: 107311. DOI: 10.1016/j.atmosres.2024.107311
- [41] LIU Xianfeng, ZHANG Jinshui, ZHU Xiufang, et al. Spatiotemporal changes in vegetation coverage and its driving factors in the Three-River Headwaters Region during 2000-2011 [J]. Journal of Geographical Sciences, 2014, **24**: 288-302. DOI: 10.1007/s11442-014-1088-0
- [42] 赵丹, 王祖伟, 张国壮, 等. 因子回归和交互联合探索区域植被覆盖度的影响因素——以三江源地区为例[J]. 中国环境科学, 2022, **42**(8): 3903-3912. [ZHAO Dan, WANG Zuwei, ZHANG Guozhuang, et al. Identifying factors affecting regional fractional vegetation cover based on a combination of factor regression and interaction: A case study on the Three-River Headwaters Region [J]. China Environmental Science, 2022, **42**(8): 3903-3912] DOI: 10.19674/j.cnki.issn1000-6923.20220329.011
- [43] BURYLO M, REY F, BOCHET E, et al. Plant functional traits and species ability for sediment retention during concentrated flow erosion [J]. Plant and Soil, 2012, **353**: 135-144. DOI: 10.1007/s11104-011-1017-2
- [44] ZHANG Lifeng, CHEN Zhiguang, ZHANG Xiang, et al. Evapotranspiration and its partitioning in alpine meadow of Three-River Source Region on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Water, 2021, **13**(15): 2061. DOI: 10.3390/w13152061

Spatial-Temporal Changes in the Critical Vegetation Coverage of Grasslands with Functions of Soil-Water Conservation, Wind-Breaking and Sand-Fixing in the Three-Rivers Headwater Region, China

YANG Yi^{1,2}, WANG Genxu^{1*}, LI Yang¹, WANG Zhiwei^{1,2}

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610299, China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The Three-Rivers Headwater Region (TRHR) is a crucial ecological barrier in China and its functions of soil-water conservation, wind-breaking and sand-fixing are great significance to the ecological security of China and its neighboring areas. A Critical Vegetation Coverage (CVC) is a key indicator for measurement of the function level of soil-water conservation, wind-breaking and sand-fixing on a regional basis, and it is applicable to quantitative evaluating of ecological level of grasslands in TRHR; unfortunately, there was little information about CVC in TRHR.

In this study, Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) and Revised Wind Erosion Equation (RWEQ) were used to simulate the variation of CVC in TRHR from 1979 to 2018 and then their spatial and temporal pattern were analyzed.

(1) In the past 40 years, the CVC for soil-water conservation in TRHR was higher in the southeast and lower in the northwest, with a multi-year average value of $12.21\% \pm 1.42\%$ and a growth rate of 0.30% ($P < 0.01$).

(2) The CVC for wind-breaking and sand-fixing was higher in the northwest and lower in the southeast, with a multi-year average value of $39.84\% \pm 11.94\%$ and a slight growth trend.

(3) The CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing had a distribution of higher values in the northwest and lower values in the southeast, with a multi-year average value of $45.38\% \pm 10.04\%$ and a growth rate of 0.32% ($P < 0.05$), ranging from 11.73% to 58.56% . In the northwest of TRHR, the CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing exceeded 50% , while in most parts of the southwest, it did not exceed 40% .

(4) It found the CVC for soil-water conservation & wind-breaking and sand-fixing had a decreasing trend in the northeastern areas of the Yangtze River headwater area and the Yellow River headwater area, with a significant decrease in the northeastern Yellow River headwater area ($P < 0.01$), whereas in the southern Yellow River headwater area as well as the Lancang River headwater area it described a significant increasing trend ($P < 0.01$).

These results would provide a scientific basis for ecological environment protection and multi-objective management in the alpine grasslands of TRHR.

Key words: critical vegetation cover; ecological threshold; ecological restoration; alpine grassland; Three-Rivers Headwater Region

(责任编辑 钟雨倩)