

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.040

CSTR:32310.14.stbxb.2025.03.040

李洪庆,刘申怡,张俊红,等.雅鲁藏布江中游泽当宽谷沙化土地识别与治理模式[J].水土保持学报,2025,39(3):268-277.

LI Hongqing, LIU Shenyi, ZHANG Junhong, et al. Identification and control countermeasures of desertified land in the Zedang wide valley in the midstream of the Yarlung Zangbo River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3): 268-277.

## 雅鲁藏布江中游泽当宽谷沙化土地识别与治理模式

李洪庆<sup>1</sup>, 刘申怡<sup>1</sup>, 张俊红<sup>1</sup>, 闫瑞强<sup>2</sup>, 徐霞<sup>1</sup>

(1. 河海大学公共管理学院, 南京 211100; 2. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042)

**摘要:** [目的] 雅鲁藏布江泽当宽谷流域是沙化土地难以治理的区域之一, 建立科学的防沙治沙模式是解决该问题的关键。[方法] 基于遥感影像识别沙化土地空间分布及其时空演变特征, 采用地理探测器评价影响土地沙化原因, 提出治理分区和模式, 并制定未来治理区域优先级。[结果] 1) 沙化土地主要沿雅鲁藏布江两岸分布, 北岸沙化严重程度明显高于南岸, 2020年土地沙化面积为407.20 km<sup>2</sup>, 相比2000年减少47.13 km<sup>2</sup>, 防沙治沙取得一定成效。2) 土地沙化主要影响因素是年平均风速、年平均气温、年蒸发量和海拔, 社会经济因素对局部土地沙化影响较大。3) 依据海拔、坡度、人类活动等因素将泽当宽谷划分为中低海拔缓斜坡固定半固定沙地、流动沙地、机场附近山体沙地等8种治理分区, 提出防风固沙林、人工封育抚育、沙产业发展等8种治理模式, 设定未来优先治理区、重要治理区与次要治理区。[结论] 研究结果可为雅江宽谷流域未来防沙治沙提供借鉴。

**关键词:** 土地沙化; 防治分区; 治理模式; 泽当宽谷

中图分类号: F205

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0268-10

## Identification and Control Countermeasures of Desertified Land in the Zedang Wide Valley in the Midstream of the Yarlung Zangbo River

LI Hongqing<sup>1</sup>, LIU Shenyi<sup>1</sup>, ZHANG Junhong<sup>1</sup>, YAN Ruiqiang<sup>2</sup>, XU Xia<sup>1</sup>

(1. School of Public Administration, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** [Objective] The Zedang wide valley basin of the Yarlung Zangbo River is one of the regions where desertified land is difficult to manage. The key to address this issue is to establish a scientific model of desertification prevention and control. [Methods] Remote sensing images were used to identify the spatial distribution and temporal evolution characteristics of desertified land. The geographical detector was employed to assess the factors influencing desertification, propose management zoning and modes, and establish priorities for future management areas. [Results] 1) Desertified land was mainly distributed along both banks of the Yarlung Zangbo River, with desertification on the north bank being significantly more severe than that on the south bank. In 2020, the desertified area was 407.20 km<sup>2</sup>, a decrease of 47.13 km<sup>2</sup> compared to 2000, indicating that desertification prevention and control had achieved certain effectiveness. 2) The main factors influencing land desertification were annual average wind speed, annual average temperature, annual evaporation, and altitude, and socio-economic factors had a relatively great impact on local desertification. 3) Based on factors such as altitude, slope, and human activity, the Zedang wide valley basin was divided into eight management zones, including fixed and semi-fixed sandy lands on gentle slopes at mid-low elevations, mobile sandy land, and mountain sandy land near the airport. Eight management modes were proposed, including windbreak and sand-fixation forests, artificial enclosure and restoration, and sand industry development. The region was designated

收稿日期: 2025-01-04

修回日期: 2025-02-21

录用日期: 2025-03-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-04-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(41801216); 国家生态安全屏障山南生态监测站监测项目(HX-QT-202303-0288)

第一作者: 李洪庆(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土地生态研究。E-mail: hongqing@hhu.edu.cn

通信作者: 李洪庆(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事土地生态研究。E-mail: hongqing@hhu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

into priority management areas, key management areas, and secondary management areas. [Conclusion] The findings of this research can provide valuable insights for desertification prevention and control in the Zedang wide valley basin of the Yarlung Zangbo River in the future.

**Keywords:** land desertification; prevention and control zoning; management mode; Zedang wide valley

Received: 2025-01-04

Revised: 2025-02-21

Accepted: 2025-03-07

Online(www.cnki.net): 2025-04-10

土地沙化指气候变化及人类活动等因素所导致的土地退化的现象,其危害包括土地资源减少、生产力衰退和自然灾害加剧,是一个重大的环境和社会问题<sup>[1-2]</sup>。青藏高原生态环境脆弱,气候条件恶劣,沙化土地分布较广,类型特殊,且受自然条件限制,沙化治理难度较大<sup>[3]</sup>。近年来,由于全球气候变化<sup>[4]</sup>、冰川退缩、区域风蚀、水蚀剧烈<sup>[5]</sup>,加上频繁的人类活动,如过度放牧、矿产开采等,进一步加剧土地沙化速度<sup>[6]</sup>。土地沙化问题不仅是青藏高原发展区域经济和生态平衡维护障碍因素,而且通过影响气候变化、能量交换、物质循环等对全国乃至全球生态环境产生极为重要和深远的负面影响<sup>[7]</sup>。因此,科学治沙对保障青藏高原生态安全屏障、提升生态环境质量和促进地区高质量发展具有重要意义。

我国在治沙领域已取得较大成就<sup>[8]</sup>,相关技术和经验也处于世界一流水平<sup>[9-11]</sup>。主要技术以工程修复为主,包括物理修复、化学修复、生物修复和综合治理措施等<sup>[12-13]</sup>。目前高寒沙地治理的研究区域主要集中在黄河源沙化区<sup>[14]</sup>、青海湖沙化区<sup>[15]</sup>和川西若尔盖沙地<sup>[16]</sup>等地区,研究内容包括土地沙化成因、沙化对生物多样性、土壤微生物等作用影响,以及提出不同的治理对策和措施<sup>[17-18]</sup>。对青藏高原雅鲁藏布江中游宽谷流域的土地沙化研究相对较少,主要集中在沙化成因与沙地理化性质分析,该地区特殊的地形地貌,发育出不同类型的风沙地貌<sup>[19]</sup>。已有研究<sup>[20]</sup>表明,沙丘物源来自冈底斯岩浆弧,风沙灾害沙源来自江心洲和河漫滩<sup>[21]</sup>,多发生在冬春季节<sup>[22]</sup>,同时河谷地区也是人类活动密集区,城镇扩张明显,农业发达,该区域虽然沙化面积相对较少,却是治理的重点,也是难点区域<sup>[23]</sup>。

国家高度重视青藏高原生态环境保护及雅鲁藏布江中游沙化治理。2021年国家发展和改革委员会会同有关部门编制《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》<sup>[24]</sup>,确定西藏生态保护与修复重大措施与工程;2022年山南市发布《山南市雅鲁藏布江保护条例》<sup>[25]</sup>,加强雅鲁藏布江流域山南段生态保护和修复;2022年国家林业和草原局等发布《全国防沙治沙规划(2021—2030

年)》<sup>[26]</sup>,将西藏“两江四河”河谷划为优先预防区,提出需加大河谷地带沙化土地综合治理。在此规划指导下,2024年3月发布《山南市防沙治沙规划(2021—2030年)》<sup>[27]</sup>,进一步布局雅鲁藏布江中游的防沙治沙和生态保护修复等工作。然而,该流域土地沙化类型多、影响因素复杂,仍需加强研究成果以完全满足沙化治理与环境保护需求。因此,本文以雅鲁藏布江中游泽当宽谷为案例,基于遥感影像识别沙化土地空间分布及其演变特征,采用地理探测器评价影响土地沙化原因,结合成因和生态敏感性分析,提出沙化土地治理分区和治理模式,并制定未来治理区域优先级,对指导土地沙化治理与生态修复,维护区域生态安全屏障具有重要的意义。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

泽当宽谷(29°06′35″~29°34′45″N,90°59′21″~92°0′22″E)位于西藏自治区中部、雅鲁藏布江中游和山南市北部(图1)。雅鲁藏布江由西向东横穿案例区,河谷宽阔,最宽处可达7 km,研究区总流域面积约10 410.54 km<sup>2</sup>,海拔3 237~6 601 m,平均海拔约4 488 m,气候属高原温带季风半干旱气候,冬春干旱多风,雨季集中在6—9月,年平均气温5~10℃,年平均降水量450 mm,月平均风速2—4月最大。泽当宽谷是雅鲁藏布江流域三大宽谷之一,发育典型的风沙地貌,枯水期时,河床裸露,河流、河心洲、河漫滩、河流阶地等相间排布形成雅鲁藏布江泽当宽谷地带富有特色的辫状水系,同时大风扬沙,两岸山地形态复杂,导致土地沙化十分严重,“爬升沙丘”成为宽谷流域特殊的自然景观。

泽当宽谷流域耕地条件和基础设施等十分优越,是西藏重要的粮食主产区,河谷地势平缓,交通便利,人口众多,也是重要的经济发展区。由于河谷两岸严重的土地沙化问题,对高寒脆弱的生态系统造成极大的影响,同时对人类生活与生存产生严重的干扰,如沙埋农田、草场质量降低、掩埋公路和干扰机场运行等,因此,防沙治沙成为宽谷流域生态修复的重要内容。2005年,山南市在泽当宽谷已建成全国防沙治沙综合示范区,多年来坚持把植树

造林作为防沙治沙的重要手段,提出“生态强市”战略,大力实施“两江四河”和国土绿化行动等生态修复工程。

自十八大以来,雅江流域山南段累计实施防沙治理约 4.7 万  $\text{hm}^2$ ,植树造林面积约 3.3 万  $\text{hm}^2$ ,明显改善流域生态环境和气候条件,沙尘恶劣天气次数

逐年递减,风沙对机场、高速、铁路、耕地等危害逐年减弱,防沙治沙工程不仅筑牢流域生态安全屏障,也提升人居环境。虽然土地沙化危害得到有效缓解,但是由于土地沙化类型特殊,生态系统脆弱,气候环境恶劣,尤其是“爬升沙丘”治理难度大,因此,泽当宽谷沙化治理仍然是一项艰巨且长期的任务。

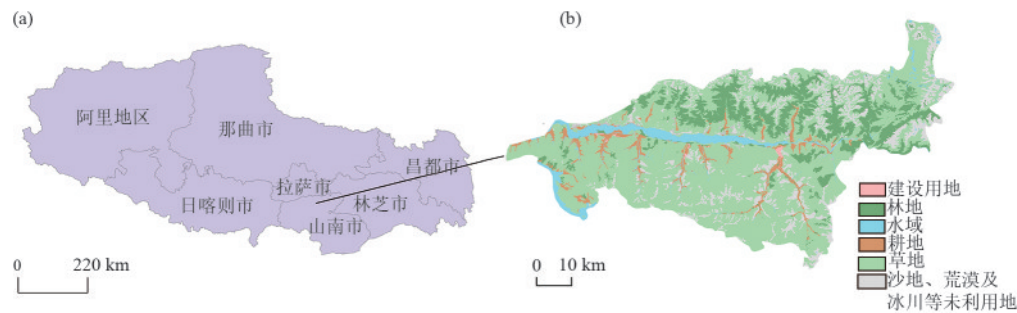


图 1 泽当宽谷流域地理位置与土地利用现状

Fig. 1 Location and land use map of the Zedang wide valley basin

## 1.2 数据来源

遥感数据来源于地理空间数据云 Landsat TM/OLI 数据,遥感影像时间为 2000 年和 2020 年的 9—11 月,2000 与 2020 年土地利用数据、土壤水分数据、NDVI 数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<https://www.resdc.cn/>),数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云平台 (<https://www.gscloud.cn/>),分辨率均为 30 m;气象数据包括平均风速、年平均气温、年降水量、蒸发量,来源于中国气象要素空间差值数据集 (<https://www.resdc.cn/DOI/doi.aspx?DOIid=96>),利用 Anusplin 差值软件生成空间差值数据,分辨率 1 km;社会经济数据包括 GDP、人口等来源于 2000 年和 2020 年《山南市统计年鉴》<sup>[28]</sup>。

表 1 土地沙化类型划分及遥感解译标志

Table 1 Classification of desertification types and remote sensing interpretation markers

沙地类型	色调	纹理	植被盖度/%	归一化植被指数
固定沙地	图像颜色为黄白色,覆盖红色斑点	纹理较细,色调均匀	>40	呈白色,灰度值较大
半固定沙地	图像颜色为黄白色夹杂淡粉色	纹理颗粒较粗	10~40	呈灰色,灰度值较小
流动沙地	色调呈现出明亮的雪白色	波纹状的纹理特征	<10	呈黑色,灰度值很小

## 2.2 基于地理探测器的土地沙化影响因素分析

土地沙化形成受多种因素影响,结合泽当宽谷实际情况与可获取数据,基于自然因素和社会经济 2 个维度选取时空分异解释变量。泽当宽谷地形复杂,水热条件空间差异显著,气候条件和地形条件共同构成自然因素,社会经济发展衡量指标为人口规模和经济发展水平。选取海拔、坡度、年平均气温、年降水量、年平均风速、年蒸发量、距水域距离、NDVI、土壤水分、GDP、人口密度 11 个指标作为泽当宽谷土地沙化影响因子。所有指标数据均进行相同投影和空间分辨率转换,采用地理探测器分析不

## 2 研究方法

### 2.1 土地沙化类型解译

基于遥感影像识别沙化土地是当前较为完善的研究方法,通过遥感影像,结合野外实地调研,判读不同沙化土地类型的分布特征,依据地形特征、地表植被特征及沙地表面的色泽、纹理等特征<sup>[29-31]</sup>,将沙地分为固定沙地、半固定沙地和流动沙地,建立土地沙化遥感解译标志(表 1)。

根据遥感影像中波谱特性差异,进行监督分类,结合高程、色调纹理信息等辅助数据和高分辨率遥感影像对监督分类的结果进行目视判读,采用人机交互式解译方法,确定最终解译结果。解译结果经过一致性检验,Kappa 系数均>0.8。

同因素对沙化空间异质性,根据  $q$  值确定对土地沙化的交互作用强弱。

### 2.3 土地沙化治理分区划分标准

由于气候因素难以控制所以不作为治理分区划分依据,地形因素对沙地的形态、分布、面积、移动速度等具有直接作用,社会经济要素主要影响人类活动区域范围内的沙地,同时也是重点关注和治理的区域。因此,依据土地沙化影响因素及实际需求,将海拔、坡度和距离机场、道路、城镇和耕地距离作为治理划分依据。其中海拔分为[3 237 m, 3 600 m]、(3 600 m, 4 000 m]、(4 000 m, 6 601 m]共计 3 级,坡

度分为 $[0^\circ, 15^\circ]$ 、 $(15^\circ, 25^\circ]$ 、 $>25^\circ$ 共计 3 级,由于土地沙化对人类活动的影响距离、程度、危害等不同,依据经验与实际将道路缓冲区按照 50、100、200 m 构建,机场缓冲区按照 1 000、5 000、10 000 m 构建,城镇按照 100、200、500 m 构建,耕地按照 50、100、200 m 构建。

2.4 土地沙化敏感性分析

土地沙化敏感性是衡量土地沙化可能性大小的重要指标,本研究评价敏感性是决定未来土地沙化治理区域优先等级的关键要素之一。参照《生态保

护红线划定技术指南》<sup>[32]</sup>中的土地沙化敏感性评价模型,选取干燥度指数、 $\geq 6$  m/s 起沙风天数、土壤砂粒质量分数、植被覆盖度 4 个因子作为土地沙化敏感性评价指标,并对单因子进行分级赋值标准(表 2),其赋值越大,表明土地沙化敏感性越高。敏感性评价公式为:

$$D = \sqrt[4]{I \times W \times T \times C}$$

式中: $D$ 为土地沙化敏感性指数; $I$ 为干燥度指数; $W$ 为起沙风天数, $d$ ;  $T$ 为土壤砂粒质量分数, $\%$ ;  $C$ 为植被覆盖度, $\%$ 。

表 2 土地沙化敏感性评价指标及权重赋值

Table 2 Evaluation indices of land desertification sensitivity and their weight

敏感性	干燥度指数	$\geq 6$ m/s 起沙风天数/d	土壤砂粒质量分数/ $\%$	植被覆盖度/ $\%$	赋值
不敏感	$\leq 1.0$	$\leq 5$	$\leq 44$	$\geq 0.60$	1
轻度敏感	1.0~1.5	5~10	44~47	0.45~0.60	3
中度敏感	1.5~4.0	10~20	47~58	0.30~0.45	5
高度敏感	4.0~16.0	20~30	58~68	0.15~0.30	7
极敏感	$\geq 16.0$	$\geq 30$	$\geq 68$	$\leq 0.15$	9

3 结果与分析

3.1 泽当宽谷土地沙化时空演变特征

根据土地沙化类型解译标准得到 2000 年和 2020 年沙化土地分布(图 2)。从空间尺度分析,2020 年沙化土地面积为 407.20 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 3.91%,其中固定沙地面积 291.81 km<sup>2</sup>,半固定沙地 63.36 km<sup>2</sup>,流动沙地 52.03 km<sup>2</sup>,主要分布在雅鲁藏布江河谷两岸大约 8 km 以内,且北岸沙化程度严重高于南岸,其中流动沙地和半固定沙地大部分分布在北岸,包括江心滩、阶地、冲洪积扇及坡地上,南岸以固定沙地为主,原因是在地形构造和地球自转偏向力作用影响下,河流北岸逐渐形成宽阔的冲洪积扇和阶地,为河床沙地和坡面沙地的形成发育提供大量的物质来源,在西南季风由南向北的搬运作用下,形成大面积的北岸沙地。从时间尺度分析,2020 年沙地面积明显少于 2000 年,共计减少 47.13 km<sup>2</sup>,减少

率为 10.37%,其中固定沙地相对是增加的,而流动沙地是减少的,表明防沙治沙产生积极的效果。从土地利用转移分析,沙地与其他土地利用类型之间转化面积为 266.27 km<sup>2</sup>,由于在河谷两岸积极实施植树造林种草等生态修复工程,一定程度上增加植被、减缓河床沙源向河岸及山坡的搬运,沙地转为其他地类面积为 156.71 km<sup>2</sup>,但是风蚀与水蚀现象依然显著,在局部地区存在沙化土地扩张的趋势,其他地类转为沙地面积为 109.56 km<sup>2</sup>,主要为草地,共计转入 82.72 km<sup>2</sup>。山南市土地沙化治理取得一定的成效,但是仍存在一定的草地退化现象,目前土地沙化面积仍然较多,且未从根源上解决沙化问题,沙地以斑块、条状、团状和连片等形态楔入其他地类,散布在人类活动密集区,制约泽当宽谷经济社会发展。因此,土地沙化形势依旧不容乐观,且治理难度逐渐增加,未来仍需加大防沙治沙力度。

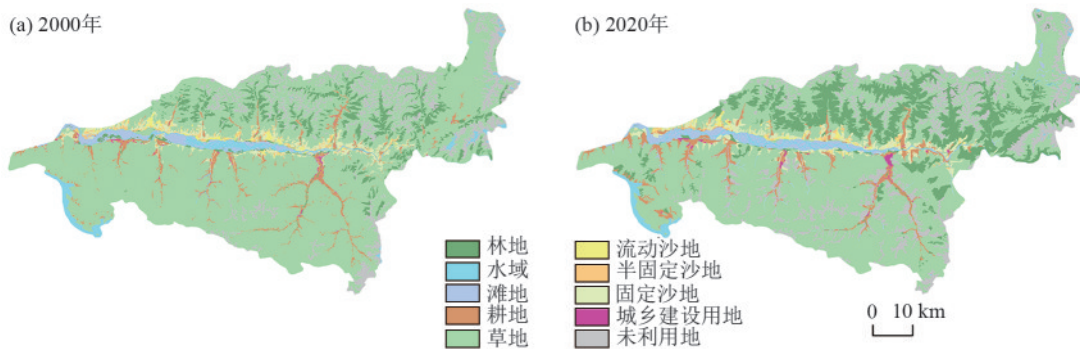


图 2 泽当宽谷 2000 年和 2020 年沙化土地空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of desertified land in the Zedang wide valley in 2000 and 2020

### 3.2 泽当宽谷土地沙化影响因素分析

2020年因子探测器的 $q$ 值排序为年平均风速(0.136 2)>年平均气温(0.131 4)>年蒸发量(0.126 2)>海拔(0.116 8)>NDVI(0.057 2)>距水域距离(0.051 8)>年降水量(0.039 6)>人口密度(0.034 8)>土壤水分(0.025 3)>坡度(0.021 1)>GDP(0.011 4),年平均风速、年平均气温和年蒸发量对土地沙化解释力为39.39%,气候要素仍是主要影响因素。河谷沉积的裸露的沙源由强风搬运至河岸、阶地和山坡,年平均风速是影响泽当宽谷土地沙化的重要因素,同时流域气温上升,蒸发量增强,导致土壤水分条件恶化,进而促使沙化过程。由于生态修复工程实施,以及气候变化促进植被恢复加快,部分地形因素对土地沙化影响程度减少。综上分析,泽当宽谷土地沙化主要影响因素为气候因素,尤其年平均风速与年平均气温,其次是地形因素,最后为社会经济因素。

### 3.3 泽当宽谷沙化土地治理分区划分

依据沙化土地治理分区划分标准,结合治沙防沙实施难度等,完成泽当宽谷沙化土地治理分区划分(图3),划分为中低海拔缓斜坡固定半固定沙地、陡坡固定半固定沙地、高海拔缓斜坡固定半固定沙地、流动沙地、河滩沙地、城镇与耕地周边沙地、道路两侧沙地、机场附近山体沙地共8个类型治理区,面积分别为111.55、43.52、8.49、34.59、38.12、63.43、61.59、45.91 km<sup>2</sup>。其中中低海拔缓斜坡固定半固定沙地治理区面积占比最大,为27.39%,流动沙地治理区面积占比较小,仅为8.50%,但流动沙地的危害最大,也最难治理。

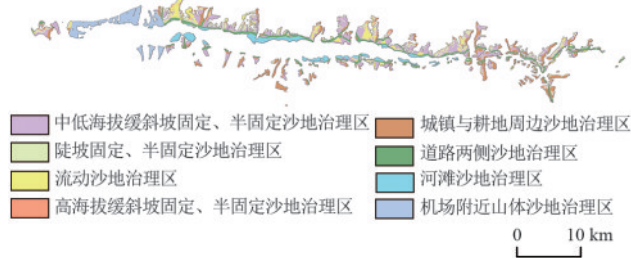


图3 泽当宽谷沙化土地治理分区

Fig. 3 Prevention and control zoning of desertified land in the Zedang wide valley

### 3.4 泽当宽谷沙化土地治理模式分析

根据近20 a防沙治沙经验和模式,提出8种适合泽当宽谷沙化土地治理的模式,并简要说明其实施技术、适宜区域及现状和未来治理重点。

#### 1) 防风固沙林模式

该模式为生物治沙与工程治沙相结合模式,常采取穴状整地或者机械开沟,品字形植树,包括沙

柳、西藏柳等树种,营造多层次多功能的防风固沙林带,同时采取修筑“丁字坝”“大苗深栽”技术,增加树苗存活率,建立健全护林保障体系,贯彻林草管护责任制。该模式适用于河滩沙地治理区,该防治区具有较为良好的水分和土壤条件,适合种植高大的防护林,该区域治沙防沙对于整个区域治理十分关键,适宜治理面积为38.12 km<sup>2</sup>。目前案例区已形成较为完善的防护林体系,只有部分冬季裸露的江心滩难以绿化,后续主要工作是补植补种,维护良好的护林保障体系。

#### 2) 流动沙地沙障固沙模式

该模式包括2种技术:一种是草方格沙障,一般选用青稞秸秆,设计1 m×1 m的方格,从沿主风向的平行方向和垂直方向进行带状交织布设,布设完后选择易发芽、抗旱的草种或者灌木种均匀点播在方格内;另一种是固沙网沙障,采用PE抗老化固沙网,垂直迎风向沿等高线带状方式布设沙障,间距2~4 m,采用“柱+网”组合结构,再点播合适的草种,具有高强度、抗氧化、可重复使用和使用寿命长的特点,主要目的是固定沙丘,减缓沙丘移动速度,从而减轻危害。该模式适用于高海拔缓斜坡固定半固定沙地治理区、陡坡固定半固定沙地治理区、流动沙地治理区,适宜治沙面积为52.03 km<sup>2</sup>。泽当宽谷多年前主要采用草方格沙障,现在使用固沙网沙障居多,已在机场、道路、城镇附近高海拔大坡度的部分地区开展实施,但是由于强烈的风蚀作用,实施几年后土地沙化现状并未得到有效改善。

#### 3) 人工封育抚育模式

该模式是将沙化土地进行区域封禁,依靠其生态系统自我修复和更新能力完成植被恢复,辅以人工补种、抚育、管护等措施,提高生态修复速度,是一种省时省力、投入较少、成效显著的治沙方法,根据实际立地条件可分为全封、半封和轮封。该模式适用于中低海拔缓斜坡固定半固定沙地治理区和土地沙化已修复且需要休养的地区,适宜治理面积为355.17 km<sup>2</sup>。目前仅在很少的一部分地区开展人工封育抚育模式,主要原因是影响当地放牧,产生一定的冲突,随着畜牧养殖方式的变化,封育区也将逐渐增加。

#### 4) 飞播造林种草模式

该模式是利用飞机等载具将草种撒播在宜播土地上,生根发芽,常用树草种为沙棘、锦鸡儿、砂生槐、臭椿、沙蒿等,实现植被覆盖度增加,防沙治沙的目标,具有速度快、投资少、见效快、范围广、易形成规模等优势。该模式可适用于阶地和坡地治理区,适宜治理面积为204.18 km<sup>2</sup>。西藏自治区于2020年

在林草局组织下第1次开展飞播造林种草试验,由于其沙化土地难以作为种子发芽提供必要的条件,其成活率预估低于10%。

#### 5)沙产业模式

该模式是引入企业发展沙产业,包括沙区农林牧初级服务业、沙地资源加工利用业和沙产业旅游服务业等,是驱动治沙的内生动力,在防风固沙改善生态环境的同时,实现资源增值、企业增效的可持续发展。该模式适用于水土条件配合较好的地区、在城郊地区和交通便利、自然条件优越的河谷地区,适宜治理面积为111.42 km<sup>2</sup>。目前已建成扎囊国家沙漠公园,以独特的雅鲁藏布江辫状水系、高原沙漠景观和丰富的游乐项目为主,建设完成20多个矮化苹果种植基地,现种植面积已达0.3 hm<sup>2</sup>,带动1.3万人就业,增收1.1亿元,在促进就业增收的同时有效治理土地沙化问题。在未来可持续引入社会资本,多方面挖掘产业,尤其是旅游业的拓展。

#### 6)公路防护绿化工程模式

该模式由生物工程阻沙带和路基固沙带组成,将公路两侧沿线50 m范围内的沙丘推平,铺设草方格等固沙措施,在沙丘上风向设置高立式沙障减少道路积沙,道路两侧绿化营造防沙林带,建立绿色走廊,减少风沙对公路的危害。该模式适用于道路两侧沙化治理区,适宜治理面积为61.59 km<sup>2</sup>。泽当宽谷流域拥有多条重要高速公路、铁路、国道等,在建设过程中为防止流动沙丘破坏,已在两侧开展防护绿化工程,现已完成长度约160 km、面积约3.4万hm<sup>2</sup>的公路绿化,基本覆盖主要的公路与铁路,在今后主要任务为维护交通沿线防护林。

#### 7)城镇和农田林网模式

该模式是根据风向、沙源及危害程度,沿城镇、农田前缘营造单带式、多带式 and 网片带、乔灌草混为一体的大型防风阻沙林带,根据适地适树原则选取适宜的乔木树种和灌木树种,也可选择适生的经济树种和果树建设生态经济型林带,提高沙化治理经济价值。该模式适用于城镇和耕地周边沙地治理区,适宜治理面积为63.43 km<sup>2</sup>。目前城镇与耕地周边防护林已基本成形,发挥积极的生态价值,但是农用地面积从2000年359.38 km<sup>2</sup>增长到426.94 km<sup>2</sup>,在此增长速度与规模下,未来防护林体系的建设需同步进行。

#### 8)机场附近山体沙化模式

该模式主要是针对机场附近山体沙化治理,在附近10 km内开展山体绿化工程,包括在江滩及水分条件较好的河床沙地进行人工造林,在坡度大海拔高的流动沙地设置复合沙障,其目的是保障机场运

行服务,该治理模式下资金充足,效果明显。该模式仅适用于机场附近坡地沙化治理区,适宜治理面积为45.91 km<sup>2</sup>。机场附近山体沙化治理一直是西藏防沙治沙的重点区域,陆续实施贡嘎机场高速沿线山体沙化防治专项项目、营造林先造后补工程(贡嘎县机场周边绿化I、II项目)等,累计治理沙化面积超万亩,2024年再次投入贡嘎机场周边山体绿化工程6600余万元,绿化面积176.22 hm<sup>2</sup>,完全保障贡嘎机场安全运行。未来重点工作是巩固现有沙化防治成果,继续不断扩大机场周边山体沙化土地治理范围。

根据泽当宽谷沙化土地治理分区、治理模式、防沙治沙实际经验、资金可投入量等,将上述适宜治理区按照成片性和连贯性原则,完成泽当宽谷土地沙化治理模式总体布局图(图4)。防风固沙林模式、流动沙地沙障固沙模式、人工封育抚育模式、飞播造林种草模式、沙产业模式、公路防护绿化工程模式、城镇和农田林网模式、机场附近山体沙化模式适宜治理面积和占流域沙地总面积的比例分别为40.28(9.89%)、35.00(8.6%)、54.12(13.29%)、33.19(8.15%)、50.90(12.50%)、69.03(16.95%)、77.04(18.92%)、47.64 km<sup>2</sup>(11.70%)。

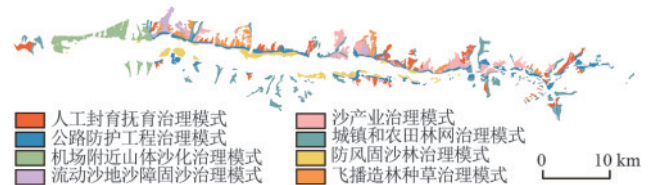


图4 泽当宽谷沙化土地治理模式布局

Fig. 4 Layout of desertified land prevention and control mode in the Zedang wide valley

### 3.5 基于土地利用敏感性的泽当宽谷沙化土地治理优先级

山南市已探索出完善的“截沙源、降风速、固流沙、增植被”河谷防沙治沙技术体系,形成“水利配套先行、工程措施紧跟、多措并举集成、实现生物固定”的河谷防沙治沙模式,在防沙治沙技术上已经相对成熟,也取得一定的成效,未来仍需不断加大沙化土地生态修复,但是沙化治理作为一项长期性、系统性的建设工程,投资大、耗时长、见效慢,必然要求科学制定防沙治沙规划,突出重点、分步实施。因此,依据泽当宽谷土地沙化治土地沙化影响因素治理模式图、土地沙化敏感性、人类活动密集性、相关政策文件等制定治理优先区。

首先,根据泽当宽谷土地利用敏感性分布(图5),极敏感区域大面积分布在雅鲁藏布江流域河滩地,是土地风沙灾害的主要沙源地,冬春季平均风速大,河滩沙地裸露,同时季节性过水河漫滩治理难

度大,因此,该区域对整个流域的风沙治理具有重要的作用,为从源头控制沙化发生,将极敏感区与沙化分布重合区全部设定为优先治理区,高度敏感区部分设为重要治理区。

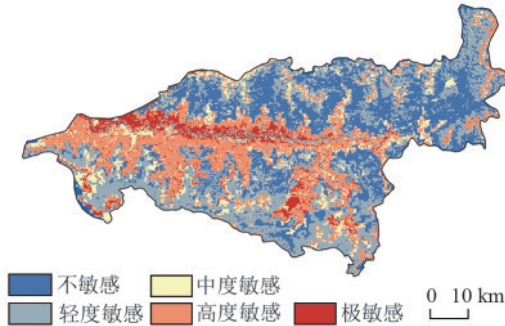


图 5 泽当宽谷土地利用敏感性分布

Fig. 5 Distribution of land use sensitivity in the Zedang wide valley

其次,根据影响因素结果,土地沙化受气候、地形和人类活动影响,在脆弱的自然环境本底上,人类活动对其干扰强度是最大的,土地沙化也对生产、生活造成较大的损害。人类活动密集区,包括机场、道路、水域、城镇附近也应进行优先治理,划定为优先治理区。

最后,在高海拔、高坡度区域,叠加中度敏感区域作为次重要治理区,该区域立地条件较差,沙化治理难度大,资金投入大,成本高,且难以达到预期治沙效果,作为次重要治理区。经过叠加、筛选处理,得到泽当宽谷沙化土地治理优先等级分区(图6)。

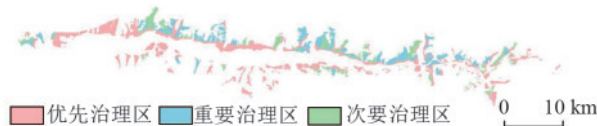


图 6 泽当宽谷沙化土地治理优先级分区

Fig. 6 Priority zoning of desertification control in the Zedang Wide Valley

优先治理区未来主要工作为在土地沙化源头区、城镇、农田和人类活动密集区建设以防沙治沙为主的工程体系,遏制土地沙化速度,提高植被覆盖度,缓解区域人口、资源、环境与社会经济发展的矛盾,逐步实现区域生态系统良性循环、三大效益协调,规划重点区域面积为 233.99 km<sup>2</sup>,占沙化土地总面积 57.46%。建议近期重点布局沿江防护林体系建设、城镇和农田防护林网建设、机场附近山体绿化工程、公路铁路防护绿化体系、草场改良工程等。重要治理区面积 118.46 km<sup>2</sup>,建议采用人工封育抚育、防风固沙林、飞播等技术手段逐渐开展工作。次要治理区面积 54.75 km<sup>2</sup>,以高海拔、高坡度的流动、半流动沙地为主,治理难度大、投入产出比小,建议在资金、技术等条件满足要求时开展治理。

## 4 讨论

本文通过遥感数据解译分析泽当宽谷沙化土地空间特征,主要分布在雅鲁藏布江河谷两岸,且北岸较南岸沙化程度严重,与詹琪琪等<sup>[29]</sup>研究结果一致。从时间趋势上 2020 年较 2000 年沙化土地面积缩减,整体呈降低趋势,但局部仍存在土地退化风险,该结论与第 6 次荒漠化和沙化土地监测结果<sup>[33]</sup>基本一致。由于宽谷地区地形开阔、大风天气多且植被覆盖度较低,水蚀与风蚀严重,气候因素与地形因素是土地沙化的主要成因,与已有研究<sup>[34]</sup>结论相同,但是随着人类活动越来越强烈,尤其是城镇扩张、大型工程建设和生态修复工程实施等,不断地影响土地沙化速度,有效地防沙治沙是宽谷地区高质量发展的重要保障。本文所提出的沙化治理模式均在案例区实践过,且根据治理效果和目的对流域沙地进行分区,依据难易、重要程度设计优先治理区域,由于本文研究空间尺度较大,未能具体到地块尺度,但研究结果对于未来泽当宽谷沙化治理规划、管控路径等具有较高的指导意义。沙化治理是一项系统性、长期性的工程,为能持续推进沙化土地治理,应秉承经济性发展原则,将有限的资金合理地运用于土地沙化防治中,突出重点,防治结合,因地制宜,未来形成科学的土地沙化防治对策体系。

## 5 结论

1) 2020 年土地沙化面积为 407.20 km<sup>2</sup>,其中固定沙地面积为 291.81 km<sup>2</sup>,半固定沙地 63.36 km<sup>2</sup>,流动沙地为 52.03 km<sup>2</sup>,雅鲁藏布江北岸沙化严重,与 2020 年面积相比,减少 47.13 km<sup>2</sup>,其中固定沙地面积是增加,防沙治沙取得一定的成果。

2) 泽当宽谷土地沙化的主要影响因素是气候因素,其次是地形因素和社会经济因素,其中年平均风速、年平均气温、年蒸发量和海拔是影响土地沙化的主要因素,社会经济因素影响范围较小。

3) 泽当宽谷沙化土地治理分区划分为中低海拔缓斜坡固定半固定沙地、陡坡固定半固定沙地、高海拔缓斜坡固定半固定沙地、流动沙地、河滩沙地、城镇与耕地周边沙地、道路两侧沙地、机场附近山体沙地 8 种类型治理区,对应提出防风固沙林、流动沙地沙障固沙、人工封育抚育、飞播造林种草、沙产业、公路防护绿化工程、城镇和农田林网和机场附近山体绿化等 8 种治理模式,完成沙化适宜治理模式空间布局。

4) 未来泽当宽谷优先治理面积为 233.99 km<sup>2</sup>,重要治理区面积为 118.46 km<sup>2</sup>,最难治理也是优先级最低的次要治理区面积为 54.75 km<sup>2</sup>。

## 参考文献:

- [1] 陈冬冬,田丽慧,张登山,等.青藏高原土地沙化研究进展[J].青海农林科技,2023(4):42-46.  
CHEN D D, TIAN L H, ZHANG D S, et al. Research progress of land desertification in Qinghai-Xizang Plateau [J]. Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry, 2023(4):42-46.
- [2] 李嘉豪,刘玉国,赵紫晴,等.小滦河流域土地沙化时空动态监测及景观格局演变特征[J].浙江农林大学学报, 2023, 40(6):1322-1332.  
LI J H, LIU Y G, ZHAO Z Q, et al. Temporal and spatial dynamic monitoring of land desertification and landscape pattern evolution characteristics in the Xiaoluan River basin [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2023, 40(6):1322-1332.
- [3] 李作成,张路,欧阳志云,等.基于Google Earth Engine的青藏高原土地沙化模拟与动态评估[J].生态学报, 2023, 43(4):1526-1536.  
LI Z C, ZHANG L, OUYANG Z Y, et al. Land desertification simulation and dynamic assessment of Qinghai-Xizang Plateau based on Google Earth Engine [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4):1526-1536.
- [4] ZHANG C L, LI Q, SHEN Y P, et al. Monitoring of aeolian desertification on the Qinghai-Xizang Plateau from the 1970s to 2015 using Landsat images [J]. Science of the Total Environment, 2018, 619:1648-1659.
- [5] LI Q, ZHANG C L, SHEN Y P, et al. Quantitative assessment of the relative roles of climate change and human activities in desertification processes on the Qinghai-Xizang Plateau based on net primary productivity [J]. Catena, 2016, 147:789-796.
- [6] QIN X M, ZHAO D M, ZHANG B J, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion during 1990-2020 in the Yarlung Zangbo River basin, southern Tibetan Plateau [J]. Land, 2023, 12(9):e1685.
- [7] 李森,董玉祥,董光荣,等.青藏高原土地沙漠化区划[J].中国沙漠,2001,21(4):418-427.  
LI S, DONG Y X, DONG G R, et al. Regionalization of land desertification on Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(4):418-427.
- [8] ZHANG Z H, HUISINGH D. Combating desertification in China: Monitoring, control, management and revegetation [J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 182:765-775.
- [9] 段翰晨,黄背英.基于AHP与改进型MEDALUS模型耦合的科尔沁沙地土地沙漠化敏感性综合评价[J].中国沙漠,2024,44(4):137-148.  
DUAN H C, HUANG B Y. Comprehensive evaluation of land desertification sensitivity in the Horqin sandy land based on the coupling of AHP and improved MEDALUS model [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(4):137-148.
- [10] 贺军奇,赵同强,陈云飞,等.毛乌素沙区地下水对植被盖度空间格局影响分析[J].水土保持学报,2023, 37(2):90-99.  
HE J Q, ZHAO T Q, CHEN Y F, et al. Effect of subsurface water on spatial pattern of vegetation coverage in Mu Us sandy area [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(2):90-99.
- [11] 黄孟冬,肖玉,秦克玉,等.1980—2018年浑善达克地区防风固沙服务时空变化及其驱动因素[J].生态学报, 2022, 42(18):7612-7629.  
HUANG M D, XIAO Y, QIN K Y, et al. Spatiotemporal dynamics and drivers of wind erosion prevention service in Otindag from 1980 to 2018 [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(18):7612-7629.
- [12] 王涛,司万童,闫瑞强,等.花棒(*Hedysarum scoparium*)对雅鲁藏布江中游山坡流动沙地土壤理化性质的影响[J].生态与农村环境学报,2020,36(12):1619-1625.  
WANG T, SI W T, YAN R Q, et al. The effects of *Hedysarum scoparium* restoration on physical and chemical properties of soil in hillside shifting sandy land in middle reaches of Yarlung Zangbo River, China [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(12):1619-1625.
- [13] HU J J, ZHOU Q P, CAO Q H, et al. Effects of ecological restoration measures on vegetation and soil properties in semi-humid sandy land on the southeast Qinghai-Xizang Plateau, China [J]. Global Ecology and Conservation, 2022, 33:e02000.
- [14] 张文娟,薛娴,彭飞,等.人工干预对黄河源区沙化草地土壤微生物群落的影响[J].草业科学,2019,36(4):970-979.  
ZHANG W J, XUE X, PENG F, et al. Effect of human intervention on soil microbial community in desertification grassland of the Yellow River source region [J]. Pratacultural Science, 2019, 36(4):970-979.
- [15] 胡樱,王慧春,李正科,等.青海湖流域沙地植物群落多样性研究[J].草地学报,2022,30(10):2782-2790.  
HU Y, WANG H C, LI Z K, et al. Plant community diversity in sandy land of Qinghai Lake basin [J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(10):2782-2790.
- [16] 费怡,王继燕,王泽根.若尔盖高原土地沙化及其成因定量分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(8):146-152.  
FEI Y, WANG J Y, WANG Z G. Dynamic changes of land desertification in Zoige Plateau [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(8):146-152.
- [17] 董凯,刘欢,刘云飞,等.藏沙蒿与多年生禾草混播对西藏沙化草地土壤酶活性和微生物生物量的影响[J].草地学报,2022,30(12):3233-3240.

- DONG K, LIU H, LIU Y F, et al. Effects of mixed-sowing of *Artemisia wellbyi* and *Perennial* grasses on soil enzyme activities and microbial biomass of desertified grassland in Tibet [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(12):3233-3240.
- [18] HE W S, YUE X. Collaborative governance in desertification control in China: A case study of Hobq desert[J]. *Sustainability*, 2023, 15(3):e1979.
- [19] ZHANG B J, XIONG D H, TANG Y F, et al. Land surface roughness impacted by typical vegetation restoration projects on aeolian sandy lands in the Yarlung Zangbo River valley, southern Tibetan Plateau[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2022, 10(1):109-118.
- [20] 马晓莉, 李顺, 岳雅慧. 基于碎屑锆石特征的雅鲁藏布江山南宽谷风成沙丘物源示踪[J]. *第四纪研究*, 2023, 43(5):1157-1171.
- MA X L, LI S, YUE Y H. Provenance analysis of wind-formed dunes in the Shannan broad valley of the Yarlung-Zangbo River based on detrital zircon characteristics[J]. *Quaternary Sciences*, 2023, 43(5):1157-1171.
- [21] 张焱, 马鹏飞, 潘凯佳, 等. 雅鲁藏布江中游江心洲和河漫滩沉积物粒度特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2022, 36(8):161-168.
- ZHANG Y, MA P F, PAN K J, et al. Grain-size parameters in the middle reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2022, 36(8):161-168.
- [22] 马鹏飞, 张正德, 论珠群培, 等. 雅鲁藏布江曲水-泽当段风沙活动动力条件分析与风沙灾害防治建议[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(1):10-18.
- MA P F, ZHANG Z C, LUN Z, et al. Analysis on the sand transport wind power conditions and suggestions on the sand disaster preventions in the middle reaches of Yarlung Zangbo River, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2021, 41(1):10-18.
- [23] 马鹏飞, 高佳佳, 扎多, 等. 雅鲁藏布江中游风沙灾害区地表沉积物养分特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2021, 35(6):96-101.
- MA P F, GAO J J, ZHA D, et al. Analysis of soil nutrients in the aeolian disaster region along middle reaches of Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021, 35(6):96-101.
- [24] 国家发展和改革委员会. 关于印发《青藏高原生态屏障区生态保护和修复重大工程建设规划(2021—2035年)》的通知[EB/OL]. [2025-02-21](2021-12-07). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202112/t20211220\\_1308646.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202112/t20211220_1308646.html).
- National Development and Reform Commission. Notice on the issuance of 《Major project construction plan for ecological protection and restoration in the Qinghai-Tibet Plateau ecological barrier zone (2021—2035)》[EB/OL]. [2025-02-21] (2021-12-07). [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202112/t20211220\\_1308646.html](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202112/t20211220_1308646.html).
- [25] 山南市人民代表大会常务委员会. 关于《山南市雅鲁藏布江保护条例》的公告[EB/OL]. [2025-02-21](2023-04-30). [http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202304/t20230403\\_117890.html](http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202304/t20230403_117890.html).
- The Permanent Committee of the Shannan Municipal Peoples' Congress. Announcement of the 《Shannan city Yarlung Zangbo River protection regulations》[EB/OL]. [2025-02-21] (2023-04-03). [http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202304/t20230403\\_117890.html](http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202304/t20230403_117890.html).
- [26] 国家林业和草原局. 关于印发《全国防沙治沙规划(2021—2030年)》的通知[EB/OL]. [2025-02-21](2022-12-15). [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content\\_6903888.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content_6903888.htm).
- National Forestry and Grassland Administration. Notice on the issuance of the 《National desert prevention and control plan (2021—2030)》[EB/OL]. [2025-02-21] (2022-12-15). [https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content\\_6903888.htm](https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202309/content_6903888.htm).
- [27] 山南市林业和草原局. 关于《山南市防沙治沙规划(2021—2030年)》的政策解读[EB/OL]. [2025-02-21](2024-12-04). [http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202412/t20241204\\_143934.html](http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202412/t20241204_143934.html).
- Shannan Forestry and Grassland Bureau. Policy interpretation on the 《Shannan city desert prevention and control plan (2021—2030)》[EB/OL]. [2025-02-21] (2024-12-04). [http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202412/t20241204\\_143934.html](http://www.shannan.gov.cn/xwzx/tggs/202412/t20241204_143934.html).
- [28] 山南市统计局. 山南市统计年鉴[M]. 山南市: 山南市统计局, 2020.
- Shannan Bureau of Statistics. Shannan statistical year-book[M]. Shannan: Shannan Bureau of Statistics, 2020.
- [29] 詹琪琪, 赵伟, 杨梦娇, 等. 雅鲁藏布江中部流域土地沙化遥感识别[J]. *地球信息科学学报*, 2022, 24(2):391-404.
- ZHAN Q Q, ZHAO W, YANG M J, et al. Identification of sandy land in the midstream of the Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2022, 24(2):391-404.
- [30] 赵银兵, 何政伟, 倪忠云, 等. 雅鲁藏布江曲水-乃东段沙化空间特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(8):135-140.
- ZHAO Y B, HE Z W, NI Z Y, et al. Spatial feature of desertification in Qushui-Naidong area of Yarlung Zangbo River [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(8):135-140.
- [31] ZHAN Q Q, ZHAO W, YANG M J, et al. A long-term record (1995—2019) of the dynamics of land

- desertification in the middle reaches of Yarlung Zangbo River basin derived from Landsat data[J]. *Geography and Sustainability*, 2021, 2(1):12-21.
- [32] 生态环境部. 关于印发《生态保护红线划定技术指南》的通知 [EB/OL]. [2025-03-20] (2015-04-30). [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518\\_301834.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm).
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Notice on the issuance of the 《Technical guide for ecological conservation red line delineation》[EB/OL]. [2025-03-20] (2015-04-30). [https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518\\_301834.htm](https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201505/t20150518_301834.htm).
- [33] 咎国盛,王翠萍,李锋,等.第六次全国荒漠化和沙化调查主要结果及分析[J]. *林业资源管理*, 2023(1):1-7.
- ZAN G S, WANG C P, LI F, et al. Keydata results and trend analysis of the sixth national survey on desertification and sandification[J]. *Forest Resources Management*, 2023(1):1-7.
- [34] 吕振豫,王鹏翔,董义阳,等.雅鲁藏布江中上游流域土地沙化时空演变特征分析与归因识别[J]. *水土保持通报*, 2025, 45(1):105-113.
- LV Z Y, WANG P X, DONG Y Y, et al. Spatiotemporal evolution analysis and attribute identification of land desertification in middle and upper reaches of Yarlung Zangbo River[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45(1):105-113.
- (上接第267页)
- [60] 陆逸. 基于MODIS数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- LU Y. Estimation of vegetation net primary productivity in the three gorges reservoir region based on the MODIS data[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012.
- [61] 王馨爽,吴梦月,马红利,等.渭河流域长时间序列NPP估算及时空变化特征分析[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(6):205-211.
- WANG X S, WU M Y, MA H L, et al. Estimation and spatial-temporal dynamics of long time sequenced vegetation net primary productivity in the Weihe River basin[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(6):205-211.
- [62] ZHANG J, LIU M Y, ZHANG M M, et al. Changes of vegetation carbon sequestration in the tableland of Loess Plateau and its influencing factors [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(22):22160-22172.
- [63] DU Z Q, LIU X J, WU Z T, et al. Responses of forest net primary productivity to climatic factors in China during 1982—2015[J]. *Plants*, 2022, 11(21):e2932.
- [64] CHEN Z T, CHEN J P, XU G, et al. Estimation and climate impact analysis of terrestrial vegetation net primary productivity in China from 2001 to 2020 [J]. *Land*, 2023, 12(6):e1223.
- [65] YU D Y, SHI P J, SHAO H B, et al. Modelling net primary productivity of terrestrial ecosystems in east Asia based on an improved CASA ecosystem model [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2009, 30(18):4851-4866.
- [66] 王斌,刘某承,张彪.基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究[J]. *林业资源管理*, 2009(1):35-43.
- WANG B, LIU M C, ZHANG B. Dynamics of net production of Chinese forest vegetation based on forest inventory data [J]. *Forest Resources Management*, 2009(1):35-43.
- [67] LUO T X, LI W H, ZHU H Z. Estimated biomass and productivity of natural vegetation on the Tibetan Plateau [J]. *Ecological Applications*, 2002, 12(4):e980.
- [68] NI J, ZHANG X S, SCURLOCK J M O. Synthesis and analysis of biomass and net primary productivity in Chinese forests [J]. *Annals of Forest Science*, 2001, 58(4):351-384.