

# 川西北土地沙化区生态环境质量遥感动态监测

高 飞, 李娜娜, 骆劲涛

(四川省林业和草原调查规划院, 成都 610000)

**摘 要:**为了分析防沙治沙工程的实施对区域生态环境质量的影响,以川西北沙化土地为研究对象,选取沙化土地治理前(2004 年)和治理后(2014 年)的 Landsat 影像,基于 ENVI 平台,从绿度、湿度、干度、热度 4 方面分别提取归一化植被指数(NDVI)、湿度指数(WET)、建筑物—裸土指数(NDBSI)和地表温度(LST),并对这 4 个指数进行主成分分析,选择信息量较多的主成分贡献率为权重,建立遥感生态指数(RSEI)评价模型,对研究区的生态环境质量进行了评价。结果表明:2004—2014 年,研究区的 RSEI 均值由 $-0.059\ 8$ 下降为 $-0.068\ 6$ ,降幅为 $14.72\%$ ,生态环境质量总体下降;较 2004 年,2014 年优和良等级比例分别增加 $0.70\%$ 和 $1.77\%$ ,增加区域位于川西北防沙治沙工程的实施区;10 年间共有 $1.25\%$ 的区域生态得到改善, $1.96\%$ 的区域生态发生了退化,生态环境改善区域主要分布于石渠县的防沙治沙工程实施区。因此,川西北防沙治沙工程的实施对改善区域生态环境质量起到了重要的作用。

**关键词:**遥感;生态环境质量;遥感生态指数;沙化土地

中图分类号:X87; X820; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)05-0263-05

## Remote Sensing Dynamic Monitoring of Ecological Environment Quality in the Sandy Land of Northwest Sichuan

GAO Fei, LI Nana, LUO Jintao

(Sichuan Forestry and Grassland Survey and Planning Institute, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** This study aimed to monitor and evaluate the changes of eco-environment quality before and after the control of sandy land in northwest Sichuan, and analysis the impact of the sand prevention and control project on the the regional eco-environment quality. The study took the sandy land in northwest Sichuan as the study area and selected Landsat images before 2004 and after 2014 of the control of sandy land. Based on the ENVI platform, from the aspects of greenness, humidity, dryness and heat, the normalized vegetation index (NDVI), wet index (WET), land surface temperature (LST), and normalized difference building-soil index (NDBSI) were extracted. Principal component analysis on these four indexes, selected the principal component contribution rate with more information as the weighted factor and established RSEI evaluation model was performed to evaluate the eco-environment quality of the studied area. The results showed that, from 2004 to 2014, the mean value of RSEI of the study area decreased from  $-0.059\ 8$  to  $-0.068\ 6$ , a decrease of  $14.72\%$ , and the overall eco-environment quality decreased; compared with 2004, the proportion of high and good grades increased by  $0.70\%$  and  $1.77\%$ , respectively in 2014, the increasing area was located in the place where desertification prevention and control project in northwest Sichuan was implemented; within 10 years,  $1.25\%$  of the region had its eco-environmental quality improved, and  $1.96\%$  of the region experienced ecological degradation; the area that achieved improvement was mainly located in Shiqu County's sand prevention and control project site. The implementation of the sand prevention and control project in northwest Sichuan had played an important role in improving the regional eco-environment quality.

**Keywords:** remote sensing; eco-environment quality; remote sensing ecological index; sandy land

生态环境是人类赖以生存的物质基础,也是区域经济社会发展的基础与核心<sup>[1]</sup>。在自然条件变化和人类活动的双重影响下,区域范围内出现了土地沙化、水土流失、森林减少、生物多样性丧失等各种生态环境问题<sup>[2-3]</sup>。其中,土地沙化直接导致土壤细颗粒含量减少、土地生产力退化、土地资源锐减,进而加剧沙区人民贫困,给国民经济和社会可持续发展造成了极大危害<sup>[4-7]</sup>,被列为全球十大环境问题之首<sup>[8]</sup>。四川位于长江上游,生态环境质量状况会对长江下游地区产生巨大影响<sup>[9]</sup>。长期以来,受全球气候变化和人类活动影响,以川西北为主的土地沙化呈蔓延趋势,区域生态恶化加剧,严重影响群众生产生活、制约区域经济社会发展,成为全面建成长江上游生态安全屏障的重点、难点和焦点<sup>[10-11]</sup>。2007年四川省启动防沙治沙工程,累计投资逾12亿元用于沙化土地治理(<http://www.sc.gov.cn/10462/12771/2017/8/31/10432234.shtml>)。川西北沙化土地地区生态环境质量如何,防沙治沙工程实施前后生态环境质量究竟发生了怎样的变化,防沙治沙工程的实施是否发挥了应有的治理作用,对于政府部门来说都是亟需回答的问题。

目前,对川西北高寒草原的土地沙化现状、动态变化与驱动力、沙化成因、沙化土壤特征、沙化治理措施及成效评估等方面进行了较多的研究<sup>[12-16]</sup>。但大部分有关土地沙化治理成效的研究,主要是通过地面调查的方式,对沙化治理后的植被盖度、造林保存率、沙障保存率等进行调查,或对沙化治理后的土壤基本理化性质等进行研究,研究结果揭示治理后生态系统某一方面的特征,尚不能说明治理对生态环境的综合作用;且研究区面积较小,把川西北整个土地沙化区域作为一个整体进行治理成效动态监测的研究还较欠缺。为此,本研究以川西北沙化土地作为研究对象,选取治理前(2004年)和治理后(2014年)的Landsat的TM和OLI影像,通过构建遥感生态指数(RSEI)评价模型,分析沙化土地治理前后生态环境质量时空动态变化,旨在为川西北沙化土地生态环境的治理与保护及相关政策法规的制定提供科学依据。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

川西北土地沙化区域包括四川省阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州的31个县,位于长江、黄河上游水系的源头,地处青藏高原东南缘与四川盆地相交的山地峡谷连接地带,地势高耸,地形复杂。其中

西北部为川西北高原,气候寒冷,无明显四季,冬季漫长,几乎全年无夏,年均温 $-2.5\sim 6^{\circ}\text{C}$ ,降水主要集中在6—8月,年降水量 $500\sim 800\text{ mm}$ ,年蒸发量 $1\ 000\text{ mm}$ 以上,适宜各种耐寒牧草的生长,继而发育成高寒草甸;东南部为高山峡谷,沟谷地势较低,气候温和,年均温 $11.5^{\circ}\text{C}$ ,年降雨量 $500\sim 600\text{ mm}$ ,植被稀疏,主要由耐旱植物组成。川西北沙区人烟稀少,草地资源丰富,以畜牧业为主要产业。

### 1.2 数据来源

遥感影像数据下载自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>),分别为2004年和2014年的TM、OLI数据,每期为16景,共32景遥感影像。通过选择7—9月间云量在0.2以下的影像数据,保证了植被、气温等因素在相似季节具有相似状态,使研究结果具有可比性。影像预处理基于ENVI 5.3平台,分别进行辐射校正<sup>[17-18]</sup>、大气校正、影像镶嵌、配准等预处理,在此基础上进行研究区的裁剪。

### 1.3 研究方法

RSEI是完全基于遥感信息综合反映研究区域生态环境质量的指数<sup>[19]</sup>。该指数耦合了湿度、绿度、干度和热度4个可直观判断生态环境优劣的指标,快速获得区域生态环境质量状况。这4个分量指标通过利用遥感影像技术,获取湿度指数(WET)、归一化植被指数(NDVI)、建筑物—裸土指数(NDBSI)和地表温度(LST)来代表。对各个分量指标进行标准化消除量纲上的差异后,借助遥感软件进行主成分分析,根据不同因子对主成分的贡献率,自动、客观地给构建遥感生态指数的每个因子赋予不同的权值,建立RSEI评价模型,避免主观经验赋权值造成的偏差。RSEI的函数表示:

$$\text{RSEI} = f(\text{WET}, \text{NDVI}, \text{LST}, \text{NDBSI}) \quad (1)$$

各分量指标内涵及计算公式为:

(1) 湿度指标(Wet):由遥感缨帽变换所获得的湿度分量代表,反映水体、土壤和植被的湿度。基于TM影像湿度指数的计算公式参见文献<sup>[20]</sup>,基于OLI影像的湿度指数计算公式参见文献<sup>[21]</sup>。

(2) 绿度指标(NDVI):由归一化植被指数(NDVI)代表,定量反映了地表的植被状况<sup>[22]</sup>。

(3) 干度指标(NDSI):选用建筑指数IBI和裸土指数SI合成干度指数,代表土壤干化程度<sup>[23]</sup>。

(4) 热度指标(LST):由经比辐射率校正的温度来表示。温度在一日之内变化性大,基于每日绝对温

度值之间的 LST 对比可能不可靠,因此将其正规化后再进行比较<sup>[24]</sup>。

1.3.1 遥感生态指数的构建

(1) 分量指标的标准化处理。为减少 4 个指标量纲的不同对遥感生态指数结果的影响<sup>[25-26]</sup>,分别对这 4 个指标进行正规化处理,公式为:

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \tag{2}$$

式中:NI<sub>i</sub>为各个指标的正规化处理结果;I<sub>i</sub>表示各个指标在像元*i*的数值大小;I<sub>max</sub>和 I<sub>min</sub>分别为各指标统计的最大值和最小值。

(2) 遥感生态指数的计算。4 个指标经正规化处理后,借助遥感软件进行主成分分析,根据不同因子对主成分的贡献率,自动、客观地给构建遥感生态指数的每个因子赋予不同的权值,避免主观经验赋权值造成的偏差<sup>[27]</sup>。

$$RSEI = \sum_{i=1}^4 \omega_i PC_i \tag{3}$$

式中:ω<sub>i</sub>为第*i*主成分的贡献率;PC<sub>i</sub>为第*i*主成分。

根据标准化公式,将 RSEI 指数标准化到 0~1, RSEI 越接近于 1,代表生态环境越好。

1.3.2 生态环境质量分析 参考徐涵秋的研究结果<sup>[19]</sup>,将 RSEI 数值分为优(0.8~1.0)、良(0.6~0.8)、中(0.4~0.6)、较差(0.2~0.4)和差(0~0.2)等 5 个等级,统计 2004 年和 2014 年各等级相对应的面积和比例;然后将 2004 年、2014 年的 RSEI 等级图进行叠加分析,进行差值变化监测,分析研究区生态环境质量变化的时空分布。

2 结果与分析

2.1 遥感生态指数的主成分变换

由表 1 可知,在 2004 年、2014 年两个时期中,研究区湿度、绿度、干度和热度的第一主成分和第二主成分对遥感生态指数(RSEI)的贡献率合计均超过 85%,表明第一主成分和第二主成分已经集成了 4 个指标中绝大多数和生态环境质量相关的信息。在两个年份的第一主成分中,代表绿度的 NDVI 和代表湿度的 WET 指标都为正值,说明二者与生态环境质量呈正相关关系;代表干度的 NDSI 和代表热度的 LST 指标都为负值,它们与生态环境质量呈负相关关系,这与实际情况相符。

2.2 生态环境质量状况总体评价

表 2 可知,2004 年川西北土地沙化区的 RSEI 均值为-0.059 8,2014 年为-0.068 6,下降了 14.72%,说明川西北土地沙化区的生态环境质量发生了一定

程度的退化。

从 4 个指标变化情况来看,对生态指数起到正面影响的绿度和湿度指标,表现为不同的变化趋势,其中湿度均值呈增加趋势,增加了 36.19%;绿度均值呈下降趋势,下降了 12.76%;对生态指数起负面作用的干度和热度指标表现为不同程度的上升,分别上升了 89.28%和 6.45%。由此可见,总体表现为湿度的增加对生态环境质量正面影响增强,绿度、干度和热度的变化对生态环境质量的负面作用加剧,负面因素的作用相对较强,促使川西北土地沙化区 RSEI 的下降,生态环境质量发生了退化。

表 1 2004 年、2014 年各生态指标主成分分析

年份	指标	第 1 主成分	第 2 主成分	第 3 主成分	第 4 主成分
2004	湿度	0.4549	0.3492	0.4166	0.7054
	绿度	0.5639	-0.6111	-0.5029	0.2359
	干度	-0.6478	-0.0286	-0.3829	0.6580
	热度	-0.2356	-0.7098	0.6534	0.1174
	特征值	0.0559	0.0205	0.0086	0.0011
	特征值贡献率	64.9300	23.7800	10.0400	1.2500
2014	湿度	0.3575	-0.1246	0.4480	0.8099
	绿度	0.5775	0.3251	-0.7230	0.1951
	干度	-0.7026	-0.0784	-0.4490	0.5465
	热度	-0.2123	0.9341	0.2737	0.0860
	特征值	0.0792	0.0246	0.0101	0.0012
	特征值贡献率	68.8100	21.4000	8.7800	1.0100

表 2 2004 年、2014 年 4 个指标和遥感生态指数 RSEI 的均值变化

指标	2004 年	2014 年
湿度	-0.0898	-0.0573
绿度	0.5885	0.5134
干度	-0.2257	-0.0242
热度	20.1523	21.4523
RSEI	-0.0598	-0.0686

2.3 生态环境质量分级

由表 3 可以看出,2004 年,川西北沙化土地总体生态状况以较差等级和中等级为主,面积占比分别为 48.83%和 38.42%,其次为差和良等级,分别为 6.88%和 5.73%,优等级的区域占比很小,仅为 0.15%;到 2014 年,川西北沙化土地的生态状况发生了较为明显的变化,整体来说生态质量中和差等级的占比减少,分别较 2004 年减少 1.91%和 1.30%,优、良和较差等区域占比增加,分别增加 0.7%,1.77%和 0.72%,整个研究区的生态环境质量下降。

2.4 生态环境质量变化的空间分布

变化监测的结果说明(表 4),川西北沙化土地区域

RSEI 空间分布以代表生态不变的斑块为主,代表生态改善和生态退化的斑块较少。2004—2014 年,川西北土地沙化区生态环境质量主要表现为生态不变,占比达 96.79%;生态改善总面积和退化总面积占比分别为 1.25%和 1.96%,生态退化总面积大于生态改善总面积。生态退化区域的空间分布呈现出分散状,生态改善区域呈总体分散、零星聚集的特征,聚集区域主要位于沙化土地地区的西北部。

表 3 2004 年、2014 年 RSEI 等级面积变化

RSEI 等级	2004 年		2014 年	
	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
优(0.8~1.0)	1047.15	0.15	6072.66	0.85
良(0.6~0.8)	40870.80	5.73	53491.95	7.50
中(0.4~0.6)	274029.12	38.42	260515.17	36.51
较差(0.2~0.4)	348320.52	48.83	353544.03	49.55
差(0~0.2)	49048.56	6.88	39831.30	5.58
合计	713316.15	100.00	713455.11	100.00

表 4 不同时期 RSEI 差值变化监测

类别	面积/hm <sup>2</sup>	比例/%
生态改善(极差为 1,2,3,4)	8899.47	1.25
生态退化(极差为-4,-3,-2,-1)	13982.04	1.96
生态不变(极差为 0)	689382.50	96.79

3 讨论

3.1 川西北土地沙化区生态环境质量的变化

本研究通过构建遥感生态指数(RSEI),开展了 2004—2014 年川西北地区沙化土地的生态环境质量变化时空监测。研究结果显示,10 a 间 RSEI 均值下降了 14.72%,生态环境质量总体呈下降趋势。四川省第五次荒漠化和沙化监测数据也显示,相较于 2004 年、2014 年川西北沙化土地面积增加 79 805.5 hm<sup>2</sup>,沙化程度增加(半固定沙地增加 1 203.7 hm<sup>2</sup>,固定沙地增加 92 243.2 hm<sup>2</sup>)<sup>[28]</sup>;土地沙化会破坏土壤结构、降低土壤肥力,破坏土壤微生物生存环境<sup>[29-30]</sup>,且随着沙化程度的加剧,对土壤的这些影响进一步加大<sup>[14,31]</sup>;而土壤的这些变化直接导致其植被覆盖度急剧下降<sup>[13,32]</sup>,区域生态环境质量退化<sup>[33-34]</sup>。

3.2 防沙治沙工程实施对生态环境的影响

在 RSEI 变化结构上,相较于 2004 年,2014 年研究区内差等级比例减少,优、良等级比例增加。主要是由于自 2007 年起,四川实施了川西北防沙治沙工程,通过采取生物措施(植灌种草)和工程措施相结合的方法,使 54 463 hm<sup>2</sup>的沙化土地的植被得到了一定程度的恢复<sup>[28,35]</sup>,改善了区域生态环境质量;此

外,较差等级比例增加,表明沙化程度增加,与四川省第三次(2004 年)和第五次(2014 年)荒漠化和沙化监测结论一致。在 RSEI 空间分布上,生态改善区域呈总体分散、零星聚集的特征,聚集区域主要位于土地沙化区西北部的石渠县和若尔盖县。石渠县的沙化类型主要为露沙地,以轻度沙化为主,但沙化发展速度较快,是川西北防沙治沙工程实施的重点区域;自 2008 年以来石渠县每年均实施防沙治沙工程项目,至 2014 年来共完成沙化治理面积 7 954 hm<sup>2</sup>,较好地起到了增加植被覆盖度的作用。因此,防沙工程的实施有效提高了区域生态环境质量。但由于川西北沙化土地面积较大,而工程治理的区域仅占其面积的 2.67%<sup>[28]</sup>,加之沙化土地的治理是一项复杂、长期的生态工程,短期并不能显著改善其特征<sup>[11,35]</sup>,但随着治理年限的增加,植物种类、多样性指数、群落总盖度以及地上部分生物量将逐年增加<sup>[36-37]</sup>,治理区域的生态环境质量将得到逐步改善。

4 结论

(1) 川西北沙化土地地区的 RSEI 2014 年比 2004 年有所降低,表明研究区生态环境质量发生了一定程度的退化,主要原因是沙化土地面积和沙化程度的增加所致。(2) 防沙治沙工程实施区县的生态环境质量得到了改善,且优、良等级比例增加,因此川西北防沙治沙工程的实施对改善区域生态环境质量起到了重要的作用。

本研究由于数据获取来源等方面的限制,仍存在一定的不足之处。首先,仅对整个川西北沙化土地地区的生态环境质量进行了监测,要全面评估防沙治沙工程的治理成效,还应进一步对工程实施区域的生态环境质量进行监测。其次,为了同四川省荒漠化和沙化监测数据进行对比、分析,本研究仅选择了与其同期的 2 期影像数据,未来可结合第六次全省荒漠化和沙化监测数据,对生态环境质量进行更长时间的监测。

参考文献:

[1] 王静,周伟奇,许开鹏,等.京津冀地区的生态质量定量评价[J].应用生态学报,2017,28(8):2667-2676.  
[2] 傅伯杰,陈利顶,于秀波.中国生态环境的新特点及其对策[J].环境科学,2000,21(5):104-106.  
[3] 刘立冰,熊康宁,任晓冬.基于遥感生态指数的龙溪—虹口国家级自然保护区生态环境状况评估[J].生态与农村环境学报,2020,36(2):202-210.  
[4] Lamchin M, Lee J Y, Lee W K, et al. Assessment of land cover change and desertification using remote sens-



- ing technology in a local region of Mongolia [J]. *Aavances in Space Research*, 2016, 57(1): 64-77.
- [5] Karamesouti M, Panagos P, Kosmas C. Model-based spatio-temporal analysis of land desertification risk in Greece[J]. *Catena*, 2018, 167(4): 266-275.
- [6] 冯益明, 郑冬梅, 智长贵, 等. 面向对象的沙化土地信息提取[J]. *林业科学*, 2013, 49(1): 126-133.
- [7] 何介南, 徐杰, 康文星, 等. 若尔盖县土地沙化程度演变动态特征[J]. *林业科学*, 2016, 52(1): 159-165.
- [8] 李卓玲. 内蒙古自治区荒漠化现状与防治[C]//中国治沙暨沙业学会. 中国治沙暨沙业学会 2018 年学术年会论文集, 2018: 35-48.
- [9] 姚昆, 余琳, 刘光辉, 等. 基于 SRP 模型的四川省生态环境脆弱性评价[J]. *物探化探计算技术*, 2017, 39(2): 291-295.
- [10] 蒋双龙, 胡玉福, 蒲琴, 等. 川西北高寒草地沙化过程中土壤氮素变化特征[J]. *生态学报*, 2016, 36(15): 4644-4653.
- [11] 李其, 刘琳, 蔡义民, 等. 川西北高寒沙化草地治理恢复过程中 CO<sub>2</sub> 通量变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(3): 441-449.
- [12] 魏振海, 董治宝, 胡光印, 等. 近 40 a 来若尔盖盆地沙丘时空变化[J]. *中国沙漠*, 2010, 30(1): 26-32.
- [13] 廖雅萍, 王军厚, 付蓉. 川西北阿坝地区沙化土地动态变化及驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 51-54.
- [14] 舒向阳, 胡玉福, 杨雨山, 等. 川西北草地沙化对土壤可溶性有机氮及酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(1): 66-71.
- [15] 苟小林, 涂卫国, 李玲, 等. 川西北地区沙化草地特征研究[J]. *草地学报*, 2016, 24(4): 768-775.
- [16] 刘朔, 张军, 蔡凡隆, 等. 川西北高原沙区沙化治理区划与治理对策研究[J]. *四川林业科技*, 2017, 38(6): 64-68, 75.
- [17] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALIsensors[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 893-903.
- [18] Reza M I H, Abdullah S A. Regional index of ecological integrity: a need for sustainable management of natural resources[J]. *Ecological Indicators*, 2011, 11(2): 220-229.
- [19] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(5): 889-897.
- [20] Crist E P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985, 17(3): 301-306.
- [21] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. *Remote Sensing Letters*, 2014, 5(5): 423-431.
- [22] Goward S N, Xue Y K, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2/3): 225-242.
- [23] Xu H Q. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, 29(14): 4269-4276.
- [24] Xu H Q, Ding F, Wen X L. Urban expansion and heat island dynamics in the Quanzhou region, China[J]. *Ieee Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2009, 2(2): 74-79.
- [25] Melesse A M. Spatiotemporal dynamics of land surface parameters in the Red River of the North Basin[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29: 795-810.
- [26] Anyamba A, Small J L, Tucker C J, et al. Thirty-two years of Sahelian zone growing season non-stationary NDVI3 g patterns and trends[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6: 3101-3122.
- [27] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1521-1527.
- [28] 四川省林业调查规划院. 四川省第五次荒漠化和沙化监测报告[R]. 成都: 四川省林业调查规划院, 2015.
- [29] Tang Z S, An H, Shangguan Z P. The impact of desertification on carbon and nitrogen storage in the desert steppe ecosystem [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84(11): 92-99.
- [30] Allington G R H, Valone T J. Reversal of desertification: the role of physical and chemical soil properties[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(8): 973-977.
- [31] 蒲琴, 胡玉福, 何剑锋, 等. 植被恢复模式对川西北沙化草地土壤微生物量及酶活性研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 323-328.
- [32] 杨秉珣, 刘泉, 董廷旭. 川西北不同沙化程度草地土壤细菌群落特征[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(6): 45-52.
- [33] 宋慧敏, 薛亮. 基于遥感生态指数模型的渭南市生态环境质量动态监测与分析[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3913-3919.
- [34] 蒋超亮, 吴玲, 刘丹, 等. 干旱荒漠区生态环境质量遥感动态监测: 以古尔班通古特沙漠为例[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3913-3919.
- [35] 鄢武先, 邓东周, 余凌帆, 等. 川西北地区沙化土地治理有关技术问题探讨: 以川西北防沙治沙试点示范工程为例[J]. *四川林业科技*, 2015, 36(3): 62-68.
- [36] 干友民, 罗元佳, 周家福, 等. 川西北沙化草地生态恢复工程对沙地植被群落的影响[J]. *草业科学*, 2009, 26(6): 51-56.
- [37] 彭佳佳, 胡玉福, 肖海华, 等. 生态修复对川西北沙化草地土壤有机质和氮素的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(5): 149-153.