

## 四川天然草地及草地类的遥感解译指标体系研究

干晓宇<sup>1</sup>, 唐江川<sup>2</sup>, 鲁岩<sup>2</sup>, 刘琳<sup>3</sup>, 刘伟<sup>3</sup>, 侯众<sup>2</sup>, 张绪校<sup>2</sup>, 李林<sup>2</sup>, 秦盼<sup>4</sup> (1. 四川大学, 四川成都 610065; 2. 四川省草原工作站, 四川成都 610041; 3. 四川农业大学, 四川成都 611130; 4. 成都大地吉信科技有限公司, 四川成都 610072)


**摘要** 构建以遥感参数为主的天然草地及其草地类的解译指标体系, 能够高效快速地提取天然草地资源的现状特征。以四川省天然草地为研究对象, 利用多源遥感技术, 提取四川省 3 州(甘孜、阿坝、凉山)及四川盆地周边地区天然草地解译标志。结果表明, 利用近红外波段、红光波段及绿光波段指标, 配合温度、湿度、降水等非遥感指标构建的解译指标体系, 能够很好地提取四川省的 5 类主要天然草地类的分布特征, 其解译精度为 89.7%。此研究为接下来的四川省天然草地资源清查工作提供了技术支持。

**关键词** 天然草地; 遥感; 解译指标; 草地类

**中图分类号** S812 **文献标识码** A

**文章编号** 0517-6611(2019)24-0082-06

**doi**: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.24.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

**Constructing Interpretation Index System of Natural Grassland and Grassland Classes in Sichuan Province Based on Remote Sensing**  
GAN Xiao-yu<sup>1</sup>, TANG Jiang-chuan<sup>2</sup>, LU Yan<sup>2</sup> et al (1. Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065; 2. Sichuan General Grassland Station, Chengdu, Sichuan 610041)

**Abstract** Constructing the interpretation index system of natural grassland and classes of grassland based on remote sensing parameters can effectively and rapidly extract the current characteristics of natural grassland resources. In this paper, the natural grassland in Sichuan Province was taken as the research object, and multi-source remote sensing technology was used to extract the interpretation signs of natural grassland in the three prefectures and the surrounding areas of Sichuan Province. The results showed that the interpretation index system based on near infrared band, red band and green band, combined with non-remote sensing indicators such as temperature, humidity and precipitation, could extract the distribution characteristics of five main natural grassland types in Sichuan Province. The overall accuracy was 89.7%. The results provided technical support for the following natural grassland resources inventory work in Sichuan Province.

**Key words** Natural grass; Remote sensing; Interpretation index; Classes of grassland

为了解掌握全省草地资源状况、生态状况和利用状况等方面的本底资料, 提高草原精细化管理水平, 为落实强牧惠牧政策、严格依法治草和全面深化草原生态文明体制改革提供数据支撑, 四川省于 2017 年 3 月—2018 年 12 月进行了全省草地资源清查工作。此次清查的一个主要任务是查清全省天然草原面积及其分布, 以及各类天然草地在四川省的分布现状。在此基础上, 了解自 20 世纪 80 年代第一次草地资源调查后四川省草原动态变化情况。根据草地资源调查的要求, 需要能快速获取区内的草原资源分布、草原分类以及生产量信息。传统的方法费时、费力、耗人力, 在规定的时间内不能很好地完成全部工作。借助卫星遥感手段以其时效性、覆盖面广、分辨率高等优势使得快速大面积监测提取草地资源信息, 草地生长状况信息等成为可能<sup>[1-2]</sup>。

在基于遥感技术的草地资源清查过程中, 最为重要的步骤是建立基于遥感参数的解译指标体系<sup>[3]</sup>。一旦建立起遥感解译标志, 即可选择训练区, 利用深度学习中的机器学习等分类方法, 快速区别草地和非草地, 并进一步确定草地的类。该研究将遥感技术结合地形、湿度和降水等变量, 建立适合于四川省的草地资源遥感解译标志库, 为接下来的草地资源清查工作提供技术支撑。

## 1 材料与方

根据草原分类图制定需求, 该研究需要生成遥感解译精度为 1:10 万比例尺的草原分类图<sup>[4]</sup>。为达到更高的精度,

选用了更高质量的影像。其中, 非平原和丘陵地区的山地区域以 15 m 分辨率的陆地卫星 Landsat 8 OLI(Operational Land Imager 陆地成像仪)和高分一号、二号卫星影像数据为标准解译影像; 平原和丘陵地区以高分系列卫星影像和资源三号卫星影像为主, 空间分辨率为 4~8 m。遥感影像收集年份主要为 2016—2018 年, 同时结合了亚米级的 GEOEYE、WORLDVIEW 系列卫星影像数据进行草地边界提取, 采用深度学习中的机器学习方法进行草地资源信息的预提取和初步处理, 再结合人工目视解译读和后处理, 从而可以确保获取符合精度要求的草原分类图<sup>[3,5]</sup>。在建立草地遥感解译标志库的工作中, 首先要对天然草地进行认定; 然后建立遥感标志以区别天然草地和其他用地类型(如农田、林地和其他非草地类型); 最后, 对解译出来的天然草地图斑进行进一步分析, 以确定各天然草地类的遥感解译标志。

天然草地类的提取工作分为两步, 首先提取天然草地边界, 然后对提取出的天然草地斑块进行草地类的划分。根据农业部草地分类的标准, 天然草地是指天然草地优势种为自然生长行程, 且自然生长植物生物量和覆盖度大于等于 50% 的草地。天然草地按照相同气候带和植被型组的不同, 进一步划分为不同的类<sup>[6]</sup>。四川省天然草地类主要分为: 高寒草甸类、暖性灌草丛类、热性灌草丛类、山地草甸类、低地草甸类 5 类<sup>[7]</sup>。

在建立天然草地和各天然草地类的遥感解译标志过程中, 需要“天地”结合, 以确立训练样本<sup>[8]</sup>。该研究选择了高分影像数据约 960 景, 覆盖四川省所有区域。同时, 进行地面调查, 获取监测区样地的草原类型、植被盖度、高度、生物

**基金项目** 成都市哲学社会科学规划项目(2015R03)。

**作者简介** 干晓宇(1981—), 男, 四川雅安人, 讲师, 博士, 从事地理信息系统应用、遥感解译工作。

**收稿日期** 2019-05-23

量等信息。确定了 1 647 个地面样点,其中 1 545 个为有效点样点。有效地面样点数据经计算机汇总和整理,转换成地理信息软件识别的空间数据格式,作为遥感监测的训练样本。当所有地面训练样本和遥感影像所对应的像元均确定过后,利用机器深度学习的 softmax 分类器和 SVM 分类器运行分类算法并得到分类结果。将分类结果进行人工目视解译,判断分类的大体精度,并分析容易出错的类别。根据易错的分类特征,重新采集分类的样本以及设定分类的参数,或者对分类的结果进行汇总或者再分割,直到达到满意的结果为止。此时的分类参数即为所需的草地遥感解译标志。








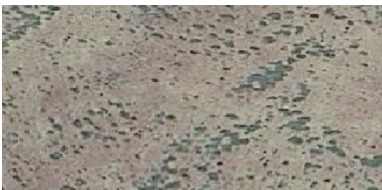

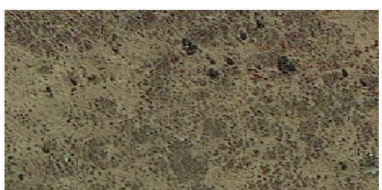

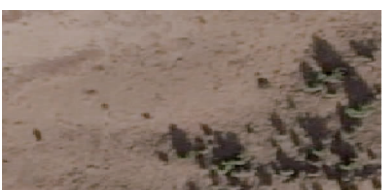
## 2 结果与分析

**2.1 天然草地遥感解译标志** 在该研究中,积雪、水体、建设用地等其他用地与草地的遥感解译参数差别较大,耕地则可参考多时相遥感影像的 NDVI(归一化差值植被指数)的变化情况很好地与草地区别<sup>[9]</sup>。难度最大的是将草地与灌木和林地进行区别。其中,郁闭度低于 10%的林草图斑,以及郁闭度低于 40%的灌木图斑均为草地,而郁闭度高于 5%的草地裸地混合图斑也归为草地。因此,典型草地训练样本的场景选择十分重要(表 1)。

根据对训练图斑相应参数值的提取,得到了分类精度最高的参数组合。该组合可用于天然草地图斑的解译标志。


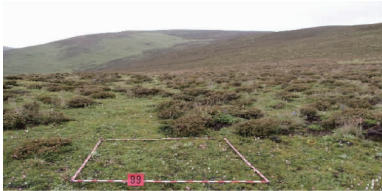

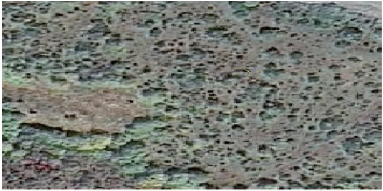




表 1 草地、灌木和林地样本及其影像特征

Table 1 Grassland, shrub and woodland samples and their image characteristics

类型 Types	分类标准 Classification standard	野外采集样本 Samples collected in the field	影像样本(真彩色) Image samples(true color)
草地 Grassland	纯草地		
			
	灌木占比小于 40%		
	林地占比小于 10%		
			
			

接下表

续表 1

类型 Types	分类标准 Classification standard	野外采集样本 Samples collected in the field	影像样本(真彩色) Image samples(true color)
灌木 Shrub	灌木占比大于 40%	 	 
林地 woodland	林地占比大于 10%	 	 

**2.2 天然草地类的遥感解译标志** 经过上一步处理,可以从遥感影像中提取出天然草地图斑。在进行下一步区分天然草地类之前,需要对这些图斑中的小碎图斑进行处理。将小图斑划分到周边大的地类当中,并通过人工目视解译纠正错分类别,最后通过构建矢量拓扑关系消除不合规定的图斑。

下一步的工作是对天然草地图斑进行进一步分析,以确定各图斑的草地类。经过第一步的处理,得到天然草地图斑 158 881 个,涵盖了四川省 5 个天然草地类。选取了 1 545 个有效地面样点作为训练样本,提取样点位置所在的天然草地图斑,依据样点地面调查信息确定该斑块的草地类。最后找到各斑块所对应的遥感影像,提取遥感参数以获得各草地类的解译标志。

由于四川省地形地貌复杂多样,加之卫星遥感影像“异物同谱,同物异谱”现象影响,导致仅仅利用遥感影像参数作为解译标志对草地类进行区分的精度难以达到要求。因此,在该研究中,天然草地类的遥感解译标志除了利用遥感影像参数外,还需要考虑地形、降水、温度等非遥感指标,形成解译标志指标体系<sup>[10-12]</sup>。

**2.2.1 各天然草地类的遥感影像参数。**将 1 545 个天然草地地面样点划分为高寒草甸类、暖性灌草丛类、热性灌草丛类、山地草甸类、低地草甸类 5 类,并将其范围制作成矢量面文件覆盖到遥感影像上,最后提取该区域遥感影像各重要波段的参数统计值,作为该类草地遥感解译标志。该研究选取的遥感影像,四川省 3 州地区为高分一号、二号卫星,盆周地区

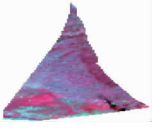



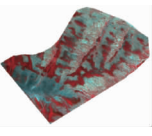
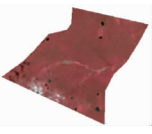

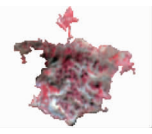


为资源三号卫星;成像时间均为 5—8 月。一般来说,在进行遥感解译时所选用的波段需要满足自身信息量充足,并和其它波段所提供的信息相互独立<sup>[13]</sup>。因此,该研究选取了遥感解译时最常用的近红外、红光和绿光波段作为指标提取波段。由于 3 州地区和盆周地区地理特征差异较大,因此将 2 个区域分开讨论。提取结果如表 2 所示。

由于参与统计的像元数量较多,像元值分布大致呈正态分布。因此,约有 95% 属于某一特定类的天然草地的像元,其像元值都将落在平均值的 2 个标准差范围内。以盆周山地草甸为例。属于该草地类的像元,其近红外波段图元像元值的取值约有 95% 都在  $328.16 \pm 14.08$  的范围之内,与其他类天然草地像元值有明显差别,可以作为遥感参数的解译指标。从表 2 数据不难发现,一些不同类的天然草地在反射光谱上非常接近,同时,有一些草地类在某一个波段的像元值取值范围非常广,最后体现在 3 个波段像元值相似的结果,造成异物同谱的现象。因此,仅仅依靠遥感参数作为解译指标并不能完全区分各天然草地类,还需要综合考虑地形、温度、降水等因素的影响<sup>[14]</sup>。

**2.2.2 各天然草地类的解译标志指标体系构建。**基于以上论述,结合全国草地分类标准<sup>[6]</sup>,该研究构建了结合遥感影像解译指标(包括近红外波段像元值、红光波段像元值、绿光波段像元值)、湿度、地形、降水量等指标结合的指标体系,旨在为四川草地资源清查工作提供技术支持(表 3),其中部分数据基于中华人民共和国草地分类标准<sup>[6]</sup>。

表 2 四川省三州地区和盆周地区各类天然草地遥感影像参数特征

Table 2 Characteristics of remote sensing parameters of various natural grasslands in three prefectures and peribasin areas of Sichuan Province

草地类 Classes of grassland	典型遥感影像特征 (假彩色) Typical remote sensing image features (pseudo-color)	近红外波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Near Infrared Band		红光波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Red Band		绿光波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Green Band	
		平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
		Average value	Standard deviation	Average value	Standard deviation	Average value	Standard deviation
阿坝高寒草甸 Aba alpine meadow		180.46	8.65	225.90	11.94	156.13	11.97
阿坝山地草甸 Aba mountain meadow		199.78	19.90	223.91	26.67	208.32	31.50
阿坝低地草甸 Aba lowland meadow		150.77	7.31	160.81	8.74	147.05	16.86
甘孜高寒草甸 Ganzi alpine meadow		282.68	29.62	254.64	35.71	266.58	42.71
甘孜山地草甸 Ganzi mountain meadow		216.90	39.08	240.82	50.02	271.35	68.91
甘孜低地草甸 Ganzi lowland meadow		143.79	11.08	138.06	11.56	148.28	12.93
凉山高寒草甸 Liangshan alpine meadow		114.87	14.32	131.70	17.94	62.35	79.56
凉山热性灌草丛 Tropical shrub tussock type rangeland in Liangshan		136.95	18.33	123.84	23.26	60.73	74.58
凉山暖性灌草丛 Warm-temperate shrub tussock type rangeland in Liangshan		144.80	20.74	134.19	26.53	53.73	80.84
凉山山地草甸 Liangshan mountain meadow		147.22	18.21	125.91	24.87	43.20	69.64
盆周高寒草甸 Alpine meadow around the basin		272.34	21.07	329.87	34.37	297.97	44.89
盆周热性灌草丛 Tropical shrub tussock type rangeland around the basin		98.34	11.06	80.39	16.48	100.76	28.43

接下表

续表 2



草地类 Classes of grassland	典型遥感影像特征 (假彩色) Typical remote sensing image features (pseudo-color)	近红外波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Near Infrared Band		红光波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Red Band		绿光波段像元值特征 Pixel Value Characteristics in Green Band	
		平均值 Average value	标准差 Standard deviation	平均值 Average value	标准差 Standard deviation	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
盆周暖性灌草丛 Warm-temperate shrub tussock type rangeland around the basin		133.01	4.86	113.99	6.89	132.84	11.37
盆周山地草甸 Mountain meadow around the basin		328.16	7.04	303.38	12.60	188.71	9.34

表 3 四川省各天然草地类的遥感解译指标及其参考取值

Table 3 Interpretation indicators of remote sensing of natural grassland classes in Sichuan Province and their reference values

草地类 Classes of Grasslands	近红外波段像 元值参考范围 Range of Pixel Value in Near Infrared Band	红光波段像 元值参考范围 Range of Pixel Value in Red Band	绿光波段像 元参考值范围 Range of Pixel Value in Green Band	湿度 Humidity	降水量 Precipita- tion mm	地形 Terrain
阿坝高寒草甸 Aba alpine meadow	163.16~197.76	202.02~249.78	132.19~180.07	1.0	400	高山或高原
阿坝山地草甸 Aba mountain meadow	159.98~239.58	170.57~277.25	145.32~271.32	1.0	500	山地
阿坝低地草甸 Aba lowland meadow	136.15~165.39	143.33~178.29	113.33~180.77	—	—	河岸、河漫滩、丘 间低地、谷地
甘孜高寒草甸 Ganzi alpine meadow	223.44~341.92	183.22~326.06	181.16~352.00	1.0	400	高山或高原
甘孜山地草甸 Ganzi mountain meadow	138.74~295.06	140.72~340.86	133.53~409.17	1.0	500	山地
甘孜低地草甸 Ganzi lowland meadow	121.63~165.95	114.94~161.18	122.42~174.14	—	—	河岸、河漫滩、丘 间低地、谷地
凉山高寒草甸 Liangshan alpine meadow	86.23~143.51	95.82~167.58	0~124.7	1.0	400	高山或高原
凉山热性灌草丛 Tropical shrub tussock type rangeland in Liangshan	100.29~173.61	77.32~170.36	0~149.16	雨季 1.0 旱季 0.7~1.0	700	—
凉山暖性灌草丛 Warm-temperate shrub tussock type rangeland in Liangshan	103.32~186.28	81.13~187.23	0~161.68	1.0	550	—
凉山山地草甸 Liangshan mountain meadow	110.80~183.64	76.17~175.65	0~139.28	1.0	500	山地
盆周高寒草甸 Alpine meadow around the basin	230.20~314.48	261.13~398.61	208.19~387.75	1.0	400	高山或高原
盆周热性灌草丛 Tropical shrub tussock type rangeland around the basin	76.22~120.49	47.43~113.35	43.90~157.62	雨季 1.0 旱季 0.7~1.0	700	—
盆周暖性灌草丛 Warm-temperate shrub tussock type rangeland around the basin	123.29~142.73	100.21~127.77	110.10~155.58	1.0	550	—
盆周山地草甸 Mountain meadow around the basin	314.08~342.24	278.18~328.58	170.03~207.39	1.0	500	山地

在利用指标体系进行实际草地类遥感监测分类工作中,首先利用中高分辨率遥感影像提出非天然草地的用地类型。然后,对天然草地斑块进行进一步分类。首先利用指标体系中的遥感影像解译指标,即近红外、红光和绿光波段像元值的参考范围,对草地斑块中的每一个像元进行判断,落入某类草地指标参考范围的,则该类草地作为此像元的备选类。然后进一步判断湿度、降水、地形等指标,判断该像元最终属于哪一类草地。若仍无法用该指标体系判断,则需要对该像元进行实地考察或参考其他相关资料判断其草地类(图1)。

**2.2.3 解译精度验证。**由于遥感解译总是存在一定误差,特别是利用指标体系判断草地类的工作中,误差无法避免<sup>[15-17]</sup>。因此另外利用GIS软件,随机选取了253个野外核查样图斑,样点包含所有5个草地类。对这253个核查图斑进行实地验证,判断其分类结果是否正确。在进行实地样点与图斑叠加分析时,考虑到野外采样的GPS位置坐标可能存在一定的不精确性,因此将草地图斑的边界外延90m,即3

个Landsat 8标准多光谱像元过后,再进行判断分析。最后得到的分析结果如下,253个野外采样核查点钟,有227个核查点是正确的,总体精度为89.7%。该结果表明,利用遥感参数结合其他非遥感指标对天然草地类进行识别具有可行性和适用性。

### 3 结论

该研究采用多源遥感数据,对四川省3州地区和盆周地区的草地资源进行了提取和分类分析。在此过程中,利用多波段遥感影像像元值进行分析,选取了适合四川省草地资源遥感解译的合理指标,并确定了所选遥感指标的取值参考范围。通过对分析结果进行实地检验点的验证,发现所采用的方法具有一定的适用性,其总体精度为89.7%。分析造成分类误差的主要原因,仍然是卫星遥感影像的“异物同谱,同物异谱”现象;不同时相、不同空间分辨率和不同卫星传感器的影像源的差异;以及四川省复杂多样的地形地貌和平原丘陵地区细碎的地表地物分布特征。因此,利用遥感解译指标区分

天然草地及其所属草地类的工作,具有较好的适用性,但仍

然离不开后期处理和人工目视解译判读工作。

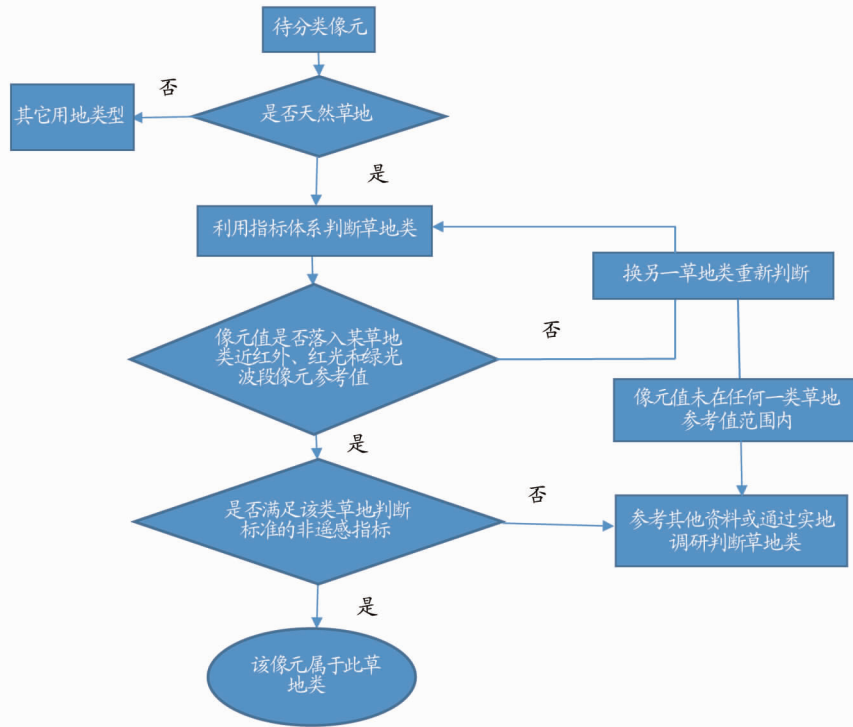


图 1 利用天然草地类的遥感解译指标体系分草地像元草地类的流程示意

Fig.1 Flow chart of classification process using remote sensing interpretation index system for natural grassland

## 参考文献

- [1] 修晓敏,周淑芳,陈黔,等.基于 Google Earth Engine 与机器学习的省级尺度零散分布草地生物量估算[J].测绘通报,2019(3):46-52,75.
  - [2] 张洪江,韩燕.3S 技术在草地遥感综合调查中的应用[J].新疆畜牧业,2004(6):56-58.
  - [3] 查勇 JAY GAO,倪绍祥.国际草地资源遥感研究新进展[J].地理科学进展,2003,22(6):607-617.
  - [4] 负旭江,董永平,尹晓飞,等.草地资源调查技术规程:NY/T 2998—2016[S].北京:中国农业出版社,2017:2-15.
  - [5] 李百红.基于遥感数据的草地信息提取及动态监测研究:以新疆哈巴河县为例[D].泰安:山东农业大学,2011.
  - [6] 负旭江,董永平,李维薇,等.草地分类:NY/T 2997—2016[S].北京:中国农业出版社,2017:2-10.
  - [7] 周寿荣,杜逸,倪炳焱,等.四川草地资源[M].成都:四川民族出版社,1989.
  - [8] 黄敬峰,王人潮,胡新博.新疆北部天然草地产草量遥感监测预测模型研究[J].浙江农业大学学报(农业与生命科学版),1999,25(2):125-129.
  - [9] 陈进发,刘畅,徐剑波.基于 TM-NDVI 的草地生产力遥感监测研究[J].安徽农业科学,2011,39(12):7365-7366,7407.
  - [10] 赵连春,刘荣堂,杨子海,等.基于地形因子的草地遥感分类方法的研究[J].草业科学,2006,23(12):26-30.
  - [11] 殷青军,汪青春,杨英莲,等.青海玛多县草地资源遥感动态监测及分析[J].青海气象,2001(3):9-14.
  - [12] 李亚楠,张丽,廖静娟,等.藏北中部地区草地退化遥感监测[J].遥感技术与应用,2013,28(6):1069-1075.
  - [13] 李辉霞,刘淑珍.高原草地退化遥感监测对象的地学属性分析:以西藏自治区那曲县为例[J].山地学报,2003,21(Z1):72-76.
  - [14] 李传新.基于遥感的锡林河流域草地退化及影响因素分析[D].北京:中国地质大学(北京),2016.
  - [15] 李培先,郑江华,倪亦非,等.阿尔金山草地鼠害发生区及鼠荒地面积遥感估算[J].新疆农业科学,2016,53(7):1346-1355.
  - [16] 刘睿.基于遥感反演的样带草地生产力模拟:以呼伦贝尔-乌里雅苏台样带为例[D].北京:中国科学院研究生院,2011.
  - [17] PITKÄNEN T P, KÄYHKÖ N.Reducing classification error of grassland overgrowth by combing low-density lidar acquisitions and optical remote sensing data[J].ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2017, 130:150-161.
- (上接第 68 页)
- [2] CHANG C H, ENTZ T.Nitrate leaching losses under repeated cattle feedlot manure application in Southern Alberta[J].Journal of environmental quality, 1996, 25(1):145-153.
  - [3] EMTERYD O, LU D Q, NYKVIKT N.Nitrate in soil profiles and nitrate pollution of drinking water in the losses region of China[J].AMBIO, 1998, 27(6):441-443.
  - [4] 穆卉,王竞,赵颖,等.流域中氮素迁移转化的研究进展[J].山西科技, 2019, 34(2):31-34.
  - [5] 李宗新,董树亭,王空军,等.不同施肥条件下玉米田土壤养分淋溶规律的原位研究[J].应用生态学报,2008,19(1):65-70.
  - [6] 郭真真,程红光,王建童,等.生物炭添加比例及冻融对沟渠土壤氮素淋失的影响[J].环境科学学报,2019,39(4):1295-1302.
  - [7] 罗艺,吴福忠,杨万勤,等.四川盆地紫色丘陵区不同种植模式下氮流失特征[J].环境科学学报,2010,30(11):2221-2228.
  - [8] 高超,朱继业,朱建国,等.不同土地利用方式下的地表径流磷输出及其季节性分布特征[J].环境科学学报,2005,25(11):1543-1549
  - [9] HESKEITH N, BROOKES P C.Development of an indicator for risk of phosphorus leaching [J]. Journal of environmental quality, 2000, 29(1):105-110.
  - [10] 鄂伦,李佩武.降雨-产流过程与氮、磷流失特征研究[J].环境科学学报,1996,16(1):111-115.
  - [11] 刘希玉,邹敬东,徐丽丽,等.不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响[J].环境科学,2014,35(8):3083-3090.
  - [12] 王星光,符奎.三杨庄遗址所反映的汉代农田耕作法[J].中国农史, 2013, 32(1):9-19.
  - [13] 何淑勤,秦凤,宫渊波,等.横垄坡面地表糙度的变化特征及其对片蚀的响应[J].水土保持学报,2018,32(1):54-58.
  - [14] 刘前进.棕壤横垄土壤侵蚀特征及其影响因素[D].武汉:华中农业大学,2014.
  - [15] 张学军,赵桂芳,朱雯清,等.菜田土壤氮素淋失及其调控措施的研究进展[J].生态环境,2004,13(1):105-108.